

Série A. 990
N° d'ordre 1822

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

André STROHL

PROFESSEUR AGRÉGÉ A LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

1^{re} THÈSE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE PHYSIQUE DE LA CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE DES ORGANISMES VIVANTS.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **18** ^{NOV 1924} novembre 1924,
devant la Commission d'examen :

MM. LOUIS LAPICQUE.... *Président.*
M. GUICHARD.... }
GUILLET..... } *Assesseurs.*

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1924

Série A. 990
N° d'ordre 1822

THÈSES

PRÉSENTÉES

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE PARIS

POUR OBTENIR

LE GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES PHYSIQUES

PAR

André STROHL

PROFESSEUR AGRÉGÉ A LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

1^{re} THÈSE. — CONTRIBUTION A L'ÉTUDE PHYSIQUE DE LA CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE DES ORGANISMES VIVANTS.

2^e THÈSE. — PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ.

Soutenues le **18 NOV 1924**
novembre 1924,
devant la Commission d'examen :

MM. LOUIS LAPICQUE....	<i>Président.</i>
M. GUICHARD....	} <i>Assesseurs.</i>
GUILLET.....	

PARIS

MASSON ET C^{ie}, ÉDITEURS

LIBRAIRES DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE

120, BOULEVARD SAINT-GERMAIN

1924

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE PARIS

MM.

Doyen..... MOLLIARD, *Profess^r*. Physiologie végétale.

Doyen honoraire. P. APPELL.

*Professeurs honoraire*s .. P. PUISEUX.
VÉLAIN.
BOUSSINESQ.



Emile PICARD	Analyse supérieure et algèbre supérieure.
KOENIGS	Mécanique physique et expérimentale.
GOURSAT	Calcul différentiel et calcul intégral.
HALLER	Chimie organique.
JOANNIS	Chimie (Enseignement P. C. N.)
JANET	Electrotechnique générale.
WALLERANT	Minéralogie.
ANDOYER	Astronomie.
PAINLEVÉ	Mécanique analytique et mécanique céleste.
HAUG	Géologie.
H. LE CHATELIER	Chimie générale.
Gabriel BERTRAND	Chimie biologique.
M ^{me} P. CURIE	Physique générale et radioactivité.
CAULLERY	Zoologie (Evolution des êtres organisés).
C. CHABRIÉ	Chimie appliquée.
G. URBAIN	Chimie minérale.
Emile BOREL	Calcul des probabilités et Physique mathém.
MARCHIS	Aviation.
Jean PERRIN	Chimie physique.
ABRAHAM	Physique.
CARTAN	Mécanique rationnelle.
LAPICQUE	Physiologie.
GENTIL	Géographie physique.
VESSIOT	Théorie des groupes et calcul des variations.
COTTON	Physique générale.
DRACH	Application de l'analyse à la géométrie.
C. FABRY	Physique.
Charles PÉREZ	Zoologie.
LEDUC	Physique théorique et physique céleste.
Léon BERTRAND	Géologie appliquée et géologie régionale.
DANGEARD	Botanique.
LESPIEAU	Théories chimiques.
RABAUD	Biologie expérimentale.
PORTIER	Physiologie comparée.
MAURAIN	Physique du globe.
MONTÉL	Mathématiques générales.
WINTREBERT	Anatomie et histologie comparées.
DUBOSQ	Biologie maritime.
N.	Géométrie supérieure.
HÉROUARD	Zoologie
Rémy PERRIER	Zoologie (Enseignement P. C. N.)
SAGNAC	Physique théorique et physique céleste.
BLAISE	Chimie organique.
PÉCHARD	Chimie (Enseignement P. C. N.)
AUGER	Chimie analytique.
M. GUICHARD	Chimie minérale.
GUILLET	Physique.
JULIA	Mathématiques générales.
MAUGUIN	Minéralogie.
BLARINGHEM	Botanique.
MICHEL-LÉVY	Pétrographie.

Secrétaire .. Daniel TOMBECK ..

A MON MAÎTRE :

MONSIEUR LE PROFESSEUR GEORGES WEISS

INGÉNIEUR EN CHEF DES PONTS ET CHAUSSEES

DOYEN DE LA FACULTÉ DE MÉDECINE DE STRASBOURG

MEMBRE DE L'ACADÉMIE DE MÉDECINE



Digitized by the Internet Archive
in 2026

INTRODUCTION

Le but que nous nous sommes assigné, en poursuivant ces recherches sur un sujet qui a déjà préoccupé bon nombre de savants, tant parmi les physiologistes que parmi les électrothérapeutes, est essentiellement limité à l'étude des conditions physiques dans lesquelles s'effectue le passage de l'électricité dans les tissus vivants.

L'idée qui nous a guidé est que l'on doit pouvoir actuellement aborder avec profit un certain nombre au moins des problèmes posés par la manière si spéciale dont la matière vivante conduit l'électricité, sous condition de mettre en œuvre des techniques de mesure nouvelles, adaptées à la nature des phénomènes à étudier.

C'est à l'élaboration de ces procédés de mesure que nous avons consacré notre activité depuis quelques années. Nous nous y sommes heurté à de grandes difficultés, et si les résultats auxquels nous sommes parvenu apparaissent comme assez peu approchés, ils ne constituent pas moins, estimons-nous, un progrès sensible dans la connaissance des données physiques vers laquelle tendent nos efforts. Ces difficultés proviennent essentiellement, comme nous le verrons, de la rapidité avec laquelle certains effets occasionnés par le passage de l'électricité se manifestent chez les êtres organisés.

L'expérimentateur qui opère sur la matière inanimée peut souvent modifier à son gré les conditions expérimentales, de manière à simplifier les phénomènes qu'il se propose d'étudier ou à en produire l'apparition dans des conditions plus favorables à l'observation.

Celui qui s'occupe des actions qui ont pour siège la matière vivante doit, au contraire, accepter les faits tels qu'ils se présentent, c'est-à-dire dans toute leur complexité, s'il ne veut pas les détruire ou les altérer gravement. Il se trouve alors obligé, pour observer ces faits, de mettre en œuvre des procédés physiques souvent d'une grande délicatesse, et encore doit-il parfois se contenter d'une approximation assez faible dans les mesures. Au surplus, il n'y a peut-être pas lieu de le regretter par trop, car une exactitude très poussée dans les procédés de mesure n'accroît notre connaissance qu'autant que les circonstances expérimentales sont assez déterminées pour que l'on soit entièrement maître de reproduire à volonté les phénomènes identiques à eux-mêmes. Ce n'est, certes, pas le cas quand l'objet d'étude est un organisme vivant. Tous ceux qui ont effectué des recherches d'électro-physiologie connaissent la difficulté qu'il y a à maintenir au même taux d'excitabilité, pendant un temps assez long, une préparation neuro-musculaire, même placée dans les meilleures conditions de conservation. Dans le cas de la résistance des êtres vivants, les causes de variabilité sont peut-être encore plus nombreuses.

Nous savons que, sous l'influence d'une action psychique un peu violente, la résistance apparente peut varier dans des proportions considérables. C'est ce qu'on appelle le *réflexe psycho-galvanique*. Gildemeister a montré que le changement qui survient dans la conductibilité est dû à une baisse de la polarisation par action des nerfs sympathiques sur la perméabilité cellulaire aux différents ions.

Cette action du système nerveux sur la perméabilité des tissus vis-à-vis du courant électrique qui, à n'en pas douter, est une cause perturbatrice dans la mesure de la polarisation est, par contre, l'indice qu'on pourra, par de telles déterminations, explorer une des fonctions de ce système végétatif qui est encore enveloppé de tant de mystère.

Des deux aspects de la question, l'un physique, l'autre physiologique, c'est le premier que nous avons le plus spécialement étudié. Avant d'interpréter des phénomènes aussi complexes, il convient, en effet, de pouvoir les mesurer, au moins approximativement, et de savoir comment ils se comportent suivant les conditions physiques. C'est à cette étude que nous nous sommes attaché dans le présent travail. Elle

est, croyons-nous, suffisamment importante pour qu'il nous soit permis de laisser un peu dans l'ombre le mécanisme même de cette polarisation, dont nous montrons l'action prédominante dans la conductibilité des êtres vivants, car il s'agit d'une étude d'un autre ordre, plutôt physico-chimique. Il sera cependant nécessaire de travailler dans cette voie, malgré les difficultés expérimentales dont elle paraît hérissée, car on touche là aux propriétés les plus fondamentales de la matière organisée.

Cette perméabilité sélective des membranes vivantes, cause des phénomènes de polarisation, se retrouve, en effet, à la base de toutes les grandes fonctions organiques : nutrition, sécrétion..., etc. Si l'on ne veut plus se contenter de connaissances vagues et insuffisantes à leur sujet, il faudra entreprendre des recherches qui nécessiteront, elles aussi, des techniques appropriées.

Jusqu'à présent, il faut bien le dire, l'on n'est pas parvenu à réaliser des modèles reproduisant l'ensemble des caractères généraux de la polarisation telle qu'on l'observe chez l'homme et les animaux. Les membranes vivantes se caractérisent par une rapidité de polarisation et de dépolarisation extrêmement plus grande, témoin d'une perméabilité très inégale vis-à-vis des différents ions et en rapport vraisemblablement avec le rôle que jouent ces membranes dans les mutations des matières minérales au sein de l'organisme.

Mais, avant que la physico-chimie soit en mesure de nous révéler, dans tout son détail, le mécanisme de ces actions essentiellement vitales, il est probable que les physiologistes et les médecins auront appliqué les notions solidement acquises, dans ce nouveau domaine, à l'exploration de la physiologie cellulaire et au diagnostic de certaines altérations fonctionnelles.

Les intéressantes recherches de Philippon sur les modifications de la conductibilité électrique au cours de l'altération cadavérique des muscles, de la germination des pommes de terre et du choc anphylactique, ainsi que celles de Watermann sur la polarisation des tumeurs cancéreuses, autorisent les plus belles espérances.

Après un court aperçu historique de notre sujet, nous avons consacré le premier chapitre à l'exposé d'expériences entreprises sur la conductibilité électrique du corps humain avec des courants de faible durée.

Les résultats auxquels nous sommes parvenu simplement avec la méthode balistique, et qui ne peuvent être guère pris en considération qu'au point de vue qualitatif, ont appelé notre attention sur la phase initiale du passage du courant, encore peu connue, et qui nous a paru pleine d'enseignement.

Le deuxième chapitre traite de nos recherches sur la polarisation électrique. Nous y décrivons, avec quelques détails, nos procédés de mesure, en nous efforçant d'évaluer la limite supérieure des erreurs auxquelles sont sujettes ces méthodes. C'est là une précaution d'une nécessité évidente, qui, malheureusement, n'a pas été prise par la plupart des auteurs qui nous ont précédé, trop souvent trompés par l'apparente rigueur des chiffres.

Pour notre part, nous avons tenu à insister sur ce fait que nous n'avons atteint qu'une valeur approchée par défaut de la force contre-électromotrice de polarisation, et encore avec une approximation qui, pour des mesures de physique pure, serait assez faible.

De même, dans le troisième chapitre, où nous exposons nos mesures de la résistance initiale du corps humain, nous avons étudié également notre technique dans le but d'en connaître la précision et avons conclu qu'elle ne pouvait donner que des résultats approchés par excès, avec une erreur de 12 à 15 %. Ceux-ci n'en constituent pas moins, croyons-nous, les meilleures données que nous possédions actuellement sur ce qui constitue vraiment la résistance du corps humain.

Le lecteur sera peut-être étonné de constater que nous n'avons pas exprimé les résultats de nos mesures en résistances par unités de volume. Cette réduction aurait été ici sans intérêt, vu l'hétérogénéité des milieux traversés par le courant. Certes, des mesures de résistance, pour chaque tissu pris isolément, sont à entreprendre et conduiront sans doute à des conclusions intéressantes relativement à leurs propriétés physiologiques. Il nous a paru cependant d'une utilité plus immédiate de nous placer dans les conditions où

l'on applique ordinairement le courant électrique à l'homme.

Dans les deux chapitres suivants, nous avons envisagé les conséquences de nos recherches dans les domaines de la technique de la mesure de la chronaxie chez l'homme et de la théorie de l'excitation électrique.

En terminant, nous exposons brièvement l'état actuel de nos connaissances sur le mode de conductibilité électrique des tissus et les hypothèses les plus vraisemblables que l'on peut émettre à ce propos.

Si notre travail est loin d'épuiser le sujet que nous nous sommes proposé, néanmoins, par la mise au point de méthodes de mesure mieux adaptées à ce genre d'étude, nous croyons qu'il a, d'une part établi un certain nombre de faits fondamentaux, et d'autre part préparé la voie à des recherches qui s'annoncent comme devant être fécondes.

Certaines des expériences qui sont citées dans ce mémoire ont été effectuées avec des collaborateurs auxquels nous devons de vifs remerciements pour le concours précieux qu'ils nous ont apporté.

C'est ainsi qu'une très grande partie des résultats consignés dans le chapitre II est empruntée à des recherches faites avec M. André Dognon, préparateur à la Faculté de Médecine de Strasbourg.

MM. les docteurs Iodka et Libert nous ont également aidé pour certaines expériences relatives à la résistance électrique de l'homme et de l'animal, et nous leur en exprimons toute notre reconnaissance.

APERÇU HISTORIQUE SUR LA CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE DES TISSUS VIVANTS

TRAVAUX ANCIENS

Innombrables ont été les travaux effectués dans le but d'étudier la conduction de l'électricité dans les tissus vivants, et cependant le mécanisme physique en est tellement complexe que, jusqu'à ces dernières années, il est resté enveloppé d'une obscurité profonde.

Pour donner une idée d'ensemble des données acquises sur cette vaste question, il est utile de considérer séparément trois ordres de recherches relatives à la résistance électrique, la capacité et les phénomènes de polarisation présentés par les tissus.

I. — RESISTANCE ELECTRIQUE

On a étudié la manière de se comporter vis-à-vis différentes sortes de courants, soit de l'ensemble de l'organisme, en faisant pénétrer le courant à travers la peau, soit de fragments de tissus, soit de liquides organiques séparés du corps. C'est de la première catégorie de ces phénomènes que nous nous occuperons ici plus particulièrement.

a. — **RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DU CORPS EN TOTALITÉ.** — En ce qui concerne le corps humain, qui fut plus spécialement l'objet des recherches, il a été procédé à des déterminations de la résistance électrique en utilisant le courant émis à voltage constant, dit continu, ou les courants faradique et alternatif.

1° Courant continu. — Un fait qui a justement frappé les premiers observateurs, c'est que la résistance électrique

du corps humain n'est pas définie au point de vue physique, c'est-à-dire qu'il n'y a pas proportionnalité entre l'intensité du courant et la différence de potentiel qui existe entre les électrodes.

Cette résistance varie, tout d'abord, avec la durée de passage, ainsi que l'a remarqué Remak pour la première fois. Nous devons à Gaertner une étude approfondie de ce phénomène. La résistance semble baisser, d'abord rapidement après la fermeture du courant, puis plus lentement, pour tendre asymptotiquement vers une valeur minima. Mais ce minimum n'est que relatif, car, si on augmente le voltage, il se produit une nouvelle baisse de la résistance, ayant la même allure, mais atteignant progressivement une seconde valeur minima plus petite que la précédente.

Pour des accroissements successifs de voltage, on finit par atteindre un minimum qui ne varie plus quand on augmente le voltage : c'est le minimum absolu.

La force électromotrice qui permet d'obtenir ce minimum absolu est elle-même fonction des conditions expérimentales et de l'état du sujet.

D'après Stintzing et Graeber [1], il y aurait, après augmentation de la force électromotrice, un léger accroissement de résistance qui précéderait la diminution consécutive. Ce fait a été nié par d'autres expérimentateurs.

2° *Courants alternatif et d'induction.* — Kundt et Kohlrausch, en effectuant des mesures de résistance par la méthode du pont de Wheatstone, ont mis en évidence un fait fondamental : c'est que les résistances, ainsi mesurées, sont bien inférieures à celles qu'avait trouvées Jolly [2], dans les mêmes conditions, avec le courant continu.

D'après certains auteurs (Frey et Wundtscheid [3]), la résistance obtenue par ce procédé est quelque chose d'absolument constant qui ne serait même pas influencé par le passage d'un courant continu ; pour d'autres (Swinburne [4]), au contraire, il y aurait, avec les courants alternatifs, des minima relatifs et un minimum absolu, en fonction du voltage, tout comme avec le courant continu.

Les hypothèses les plus diverses ont été émises pour expliquer ces variations de résistance électrique du corps humain. Successivement, on a mis en avant : des effets de cataphorèse (Munk), des actions vaso-motrices (Vigouroux) ou sudorifiques (Silva et Pescarolo). Depuis les travaux de Leduc [5], on tend à attribuer une importance de premier plan à l'entraî-

nement des ions dans les différentes couches de tissus. Cet électro-physiologiste a constaté que la nature des ions imbibant les électrodes avait une influence prépondérante sur l'évolution de la résistance électrique.

Il est, en effet, bien démontré actuellement que le siège principal de la résistance électrique chez l'homme se trouve dans l'épiderme. Celui-ci enlevé par un vésicatoire (Jolly), la résistance baisse dans de grandes proportions. Ce serait, en somme, l'introduction électrolytique des ions dans un milieu qui en est primitivement assez pauvre qui conditionnerait les variations de résistance du corps humain.

La résistance de l'organisme varie, en outre, grandement suivant les régions du corps où sont appliquées les électrodes. Elle doit dépendre du volume du corps interposé, mais cette relation est difficile à vérifier, vu l'influence prédominante de l'emplacement des électrodes. Parfois même, l'effet est l'inverse de ce qu'il devrait être. C'est ainsi que, d'après Vigouroux [6], si l'on met une électrode sur la face palmaire droite et l'autre sur la face dorsale du bras gauche, ou inversement, on trouve une résistance moindre que lorsque les deux électrodes sont placées en regard sur le même avant-bras, bien que la longueur des tissus intercalés soit moins grande dans ce dernier cas. Ce résultat paradoxal serait dû aux vaisseaux sanguins, qui constitueraient des voies de dérivation peu résistantes.

D'une manière générale, la peau présenterait une résistance plus grande du côté de l'extension du membre que du côté de la flexion.

Il y a une remarque intéressante à faire sur les régions de la paume de la main et de la plante du pied, qui se comporteraient différemment des autres parties du corps. D'après Jolly, malgré l'épaisseur de la peau à ce niveau, la résistance y serait plus faible qu'aux autres régions de la surface cutanée : joues, tempes, cou, dos, membres. Si ce fait fut contrôlé par d'autres auteurs (Silva et Pescarolo) [7,] un point sur lequel on s'accorde, en général, c'est que la décroissance de la résistance avec la durée de passage du courant ne se produit pas, à cet endroit, avec la même intensité que pour les autres régions de la peau. On a également signalé que la résistance augmenterait, à ce niveau, quand le voltage irait en croissant. Cette particularité n'a d'ailleurs pas été retrouvée par certains expérimentateurs.

b. — RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE DES TISSUS ISOLÉS. — D'importantes recherches ont été effectuées sur les nerfs, les muscles, le sang et différents liquides séparés de l'organisme.

Elles sont dominées par les phénomènes de polarisation dont nous parlons plus loin. Signalons seulement ici que la résistance des muscles et des nerfs est notablement plus petite dans leur longueur que transversalement. Après la mort, leur résistance diminue. Ces phénomènes sont liés à la résistance opposée à la progression des ions par les membranes protoplasmiques et à l'augmentation de perméabilité aux ions de ces membranes après la mort (Overton [8]).

Dans le même ordre d'idées, on observe que toute perte des propriétés physiologiques d'un nerf, par exemple par écrasement ou badigeonnage à la cocaïne, détermine une diminution de sa résistance.

II. — CAPACITÉ ÉLECTRIQUE

La plupart des auteurs sont d'accord sur ce fait que le corps humain possède une certaine capacité électrique, plus justement une capacité supérieure à celle qu'aurait un corps métallique homogène de même forme et de même surface. Il se comporterait alors comme un condensateur. Mais, là où les divergences apparaissent, c'est dans les résultats des expériences instituées pour mesurer cette capacité.

Dubois, par une méthode basée sur les courants de charge d'un condensateur et nécessitant la connaissance de la résistance ohmique du corps humain, conclut, pour celui-ci, à une capacité de 0,165 microfarad.

En s'appuyant sur des phénomènes de résonance d'un système de conducteurs parcourus par des courants de haute fréquence, Wertheim-Salomonson attribua au corps de l'homme une capacité de 0,000195 microfarad. Il a constaté de légères variations individuelles, mais aucune relation directe avec la taille. D'après cet auteur, la capacité du corps humain interviendrait pour diminuer, dans des proportions considérables, la résistance apparente du corps humain, qui, pour des courants alternatifs d'une fréquence de 2 millions, tomberait bien au-dessous de 100 ohms.

Il convient de citer également les conclusions intéressantes de Metz obtenues en mesurant, au moyen d'une méthode statique, la charge prise par le corps humain sous l'influence d'un voltage donné. La capacité électrique du corps humain

serait constante pour tous les voltages compris entre 100 et 1000 volts et exactement égale à celle d'un conducteur métallique de même forme et de mêmes dimensions que celles du sujet. Il est vrai que, comme l'observe Castex [9], la capacité moyenne en position normale, soit 0,0011 microfarad, correspondrait à la capacité d'une sphère métallique d'un mètre de rayon, donc d'une surface supérieure à celle du corps humain.

Enfin Bordier, au moyen d'une méthode subjective, donne comme chiffre moyen de la capacité du corps humain 0,0025 microfarad.

En somme, les déterminations de la capacité du corps humain concordent assez mal, et tout ce qu'on peut conclure de ces expériences, c'est qu'elle doit être très faible.

Il semble d'ailleurs que, sous le nom de capacité, l'on ait compris des phénomènes qui relèvent de la polarisation. Le terme impropre de capacité de polarisation employé par certains auteurs semble bien prouver qu'il a régné une certaine confusion à ce sujet.

III. — POLARISATION ELECTRIQUE

C'est Peltier qui, le premier, constata que, lorsque des muscles de grenouille ont été parcourus par un courant, puis séparés de la source d'électricité, il s'y développe un courant de sens inverse au courant primitif.

Du Bois-Reymond [10], reprenant plus tard ces expériences, montra que le courant secondaire ainsi produit n'est pas dû seulement à des actions siégeant au niveau des électrodes, mais que toute l'étendue du muscle traversé par le courant y participe. Aussi nomma-t-il ce phénomène : *polarisation intérieure*.

Bien que le cas du muscle soit spécialement complexe, ainsi que l'ont établi les recherches ultérieures de von Hering et d'Hermann, et qu'il faille y faire une part considérable aux actions polaires du courant, la polarisation des tissus est un fait général.

Par une expérience ingénieuse et démonstrative, Larat et Onimus [11] ont autrefois montré comment chez l'homme, donc à travers la peau, on pouvait, à l'aide d'un courant de polarisation, provoquer la contraction d'un muscle de grenouille.

Mais c'est surtout à Hermann [12], qui en a compris toute l'importance, que l'on doit une longue étude de ce phénomène. Les méthodes inventées dans ce but par cet électrophysiologiste sont celles que l'on a employées depuis, et si ses conclusions sont, sur certains points, erronées, la faute en est à sa technique qui, comme celle de la plupart de ses successeurs, a été insuffisante.

Hermann employa, pour mesurer la force contre-électromotrice de polarisation, la méthode d'opposition, mais il pratiquait cette mesure un temps trop long après que le courant qui engendrait cette polarisation avait cessé de passer. Il a, néanmoins, trouvé ainsi que la plus courte durée de fermeture et le moindre courant donnaient naissance à une polarisation appréciable. Cette force contre-électromotrice ne s'est montrée proportionnelle à l'intensité que pour des courants faibles. Il considéra les écarts comme dus à une imperfection de sa méthode et conclut néanmoins à l'existence d'un rapport invariable entre la force électromotrice de polarisation et le courant polarisant, qu'il appela constante ou quotient de polarisation. Nous verrons plus loin ce qu'il convient de penser de cette prétendue constante. Avec cette technique, Hermann trouva comme valeur maxima de la polarisation 0,419 volt pour le nerf et 0,038 pour le muscle.

Si l'on connaît la valeur exacte de la résistance de l'organisme, en retranchant du voltage de la source le produit de celle-ci par l'intensité, on obtiendra la force contre-électromotrice de polarisation. Tel est le principe d'une autre méthode indiquée par Hermann.

Cet auteur pensa avec raison qu'on ne devrait avoir une mesure de la résistance indépendante de toute polarisation qu'en utilisant des courants alternatifs d'une fréquence telle que la force contre-électromotrice n'ait pas le temps d'acquiescer une valeur notable. Il choisit comme générateur une bobine d'induction donnant environ 1500 courants induits par seconde.

Bien qu'il trouvât ainsi des valeurs de polarisation plus élevées que par la méthode précédente, il conclut avec prudence que de tels courants diminuent, mais n'annulent pas la polarisation, tout au moins dans le nerf, et que la vitesse de polarisation devait y être très grande. Hermann cependant pensa pouvoir évaluer la *résistance vraie* de l'organisme. Nous ne parlerons pas de sa méthode, qui repose sur un postulat assez contestable suivant lequel les chiffres donnés

par la méthode de compensation sont, sinon égaux, du moins proportionnels aux valeurs exactes de la polarisation.

Cet auteur s'est aussi préoccupé du siège de la polarisation et a conclu qu'elle ne devait pas résider uniquement dans les cellules, puisque certains tissus chez lesquels on a peine à admettre une polarisation endo-cellulaire, comme les tendons, sont polarisables. Il y aurait donc une partie de la polarisation qui résiderait entre les fibres ; ce serait, d'après Hermann, la polarisation d'infiltration, faible néanmoins à côté de la polarisation endo-cellulaire. En admettant que cette dernière polarisation ait pour effet d'annuler presque complètement le courant à l'intérieur des cellules, la mesure du rapport des dimensions de la substance cellulaire à la substance interstitielle, pour le muscle et le nerf, devrait donner une évaluation du rapport qui doit exister entre les résistances en travers et en long pour ces organes.

L'expérience, selon Hermann, semble vérifier ces hypothèses, quelque hasardées qu'elles puissent nous paraître.

On conçoit maintenant comment la polarisation endo-cellulaire aura comme conséquence d'augmenter la résistance apparente des muscles en travers. Les résistances vraies, en travers et en long, doivent être plus voisines l'une de l'autre, comme c'est le cas pour les conductibilités thermiques. La résistance électrique devra ainsi être la même dans les deux sens quand la force électromotrice de polarisation sera devenue nulle. C'est justement ce que l'on observe sur les muscles après la cuisson qui, d'après certains auteurs (Overton), augmente considérablement la perméabilité cellulaire aux ions. Enfin Hermann a complété ses recherches sur la polarisation par l'étude de ses variations avec la température. Il a trouvé d'une manière constante que le froid augmente tandis que la chaleur diminue la polarisation.

Depuis, d'autres expérimentateurs ont essayé de déterminer les forces électromotrices de polarisation chez l'homme.

Weiss [13] opérait de la manière suivante :

Un courant électrique, provenant d'éléments de piles, pénétrait dans le corps humain, au niveau des mains, par l'intermédiaire d'électrodes de platine, plongeant dans des cristallisoirs contenant de l'eau salée.

Dans ces mêmes cristallisoirs plongeaient de larges lames d'étain qui, vu leurs dimensions et les faibles quantités d'électricité qui les traversaient, pouvaient être considérées

comme impolarisables. Au moyen d'une clef à double contact, on pouvait, en même temps, rompre la connexion du sujet avec les piles et mettre les cristallisoirs, par l'intermédiaire des électrodes d'étain, en communication avec un condensateur qui prenait une charge proportionnelle au voltage existant entre les mains du sujet à ce moment-là.

La décharge du condensateur dans un galvanomètre balistique étalonné permettait de connaître le voltage auquel était chargé le condensateur, donc la force électromotrice de polarisation. Weiss a ainsi trouvé des valeurs de quelques dixièmes de volt. Nous verrons plus loin pourquoi il n'a pu mettre en évidence que des valeurs aussi faibles.

Chanoz [14] a repris la question un peu plus tard dans un important travail, en utilisant une technique un peu différente, et à certains égards meilleure.

La différence de potentiel existant entre les électrodes après le passage du courant était mesurée à l'aide de la méthode d'opposition. Les électrodes qui servaient à mettre en circuit les cristallisoirs dans lesquels trempaient les mains (ou les pieds) du sujet étaient constituées par un tube de verre étroit, rempli d'une solution de KCL N/10, en relation avec la même solution d'une électrode au calomel pratiquement impolarisable et d'une résistance d'environ 0,5 mégohm.

Pour faire une mesure, on supprimait le courant polarisant et on établissait, par une clef appropriée, la communication des électrodes au calomel avec un électromètre capillaire de Lipmann d'assez grande sensibilité et de faible capacité, connecté préalablement avec un potentiomètre de Carpentier actionné par deux piles Weston au cadmium.

D'après l'auteur, on évaluait ainsi à $1/1000^{\circ}$ et même $1/10.000^{\circ}$ de volt près la force électromotrice, entre les extrémités du corps, après le passage du courant.

Une première lecture était faite de cinq à trente secondes à partir de l'enlèvement de la source primaire. D'autres mesures étaient faites de trente en trente secondes d'abord, de minute en minute, etc., ensuite pendant une demi-heure, une heure et deux heures. Voici les principales conclusions de ce travail :

1° Pour des courants d'intensité variant entre 0,5 et 31,2 milliampères et de durée s'étendant de quelques secondes à 100 minutes, les polarisations se sont trouvées comprises entre 0,75 volt et quelques centièmes de volt ;

2° La polarisation ainsi obtenue se dissipe dans le temps

rapidement d'abord, puis de plus en plus lentement ensuite, suivant une courbe à peu près hyperbolique ;

3° La vitesse avec laquelle disparaît la polarisation des tissus chez l'homme vivant paraît entièrement indépendante de la résistance ajoutée au circuit des tissus polarisés. Cette vitesse est la même que le circuit extérieur aux tissus soit ouvert ou fermé.

4° Dans des conditions données, le degré de polarisation croît avec l'intensité et la durée du courant polarisant, mais non suivant la proportion simple ;

5° Il est probable qu'il existe un véritable maximum de la polarisation des tissus, comme pour la polarisation des électrodes. Peut-être est-il atteint dans certains accidents industriels par le courant continu ; on ne doit pas l'obtenir, semble-t-il, dans la pratique galvanothérapique.

6° La polarisation de l'homme vivant croît avec la longueur des tissus traversés par le courant continu, mais elle ne dépend pas seulement de la longueur des tissus.

Malgré la précision des mesures et l'abondance des résultats obtenus, nous aurons l'occasion de démontrer que ces expériences ne renseignent que sur un aspect très particulier de la polarisation des tissus.

EXPOSE ET DISCUSSION DES TRAVAUX RECENTS

Nous avons signalé, à propos des anciennes tentatives faites pour étudier la conductibilité du corps humain, les deux graves imperfections des techniques proposées.

C'est d'abord l'intervalle trop long après lequel on explore soit l'intensité du courant s'il s'agit d'une mesure de résistance, soit l'état électrique des électrodes s'il s'agit d'une mesure de polarisation, eu égard à la rapidité des modifications de ces quantités avec le temps.

Pour les méthodes où l'on emploie le courant faradique, un autre inconvénient vient de la difficulté de faire de bonnes mesures de résistances par le montage ordinaire du pont de Wheatstone avec le téléphone comme appareil de zéro. En outre, avec les interruptions dont se servaient les auteurs précités, on ne peut guère dépasser mille interruptions par seconde, ce qui est insuffisant pour éliminer complètement la polarisation, comme l'avait pressenti Hermann.

La conductibilité du corps humain pour des ondes courtes avait cependant déjà fait l'objet de quelques recherches. C'est ainsi que certains physiologistes ont cru pouvoir démontrer, au moyen d'une expérience séduisante par sa simplicité, qu'il y a variation instantanée de la résistance du corps humain. Voici en quoi consiste ce phénomène, qui a été fréquemment étudié sous le nom d'« effet Fleisch ».

Si l'on place le corps humain et un galvanomètre sensible dans le circuit secondaire d'une bobine d'induction dont le courant primaire présente de fréquentes interruptions, on observe, dans ces conditions, une déviation du galvanomètre dont le sens correspond à l'onde de rupture.

D'autre part, quand le circuit ne contient que des conducteurs à résistance ohmique, l'équipage du galvanomètre reste immobile, conformément à la théorie qui veut que, dans ce cas, les quantités d'électricité mises en jeu par les ondes de fermeture et de rupture soient égales. Le corps humain serait donc plus perméable aux ondes émises sous le potentiel le plus élevé, et sa résistance varierait périodiquement et très rapidement en sens inverse du voltage.

Ces conclusions ont été critiquées par certains auteurs pour lesquels l'explication se trouverait dans des contacts imparfaits ne pouvant être franchis que par les courants induits de rupture.

Nous avons repris cette expérience en nous entourant de toutes les précautions, pour éviter les actions parasites qui pouvaient masquer le phénomène.

Nous avons utilisé, pour faire pénétrer le courant dans les tissus, les conducteurs les plus variés : électrodes rigoureusement impolarisables au sulfate de zinc, électrodes d'argent recouvertes électrolytiquement de chlorure d'argent, électrodes spongieuses ordinaires.

Dans la plupart des cas, nous avons observé que le galvanomètre balistique, mis en série avec le corps humain, déviait dans le sens des courants de rupture. Mais, comme ce phénomène s'est produit également quand nous reliions les électrodes par un simple bain de solution physiologique en l'absence du corps humain, nous en avons conclu qu'il s'agit, dans ce cas, de phénomènes dus sans doute à de mauvais contacts et qu'on ne peut, en toute sécurité, se baser sur cette expérience pour l'étude de la conductibilité des tissus.

Dans ses recherches pour appliquer à l'homme les nouvelles méthodes d'électro-diagnostic, Bourguignon [15] a été

amené à entreprendre une étude comparée de la résistance électrique du corps humain pour les décharges de condensateur et les courants émis sous voltage constant. Il mesure la résistance électrique de la manière suivante :

Un condensateur est déchargé dans un circuit comprenant deux résistances montées en parallèle, dont l'une est métallique et de valeur connue et l'autre constituée par le corps humain. Il est alors facile de démontrer que, si les deux résistances restent constantes pendant la décharge, la quantité d'électricité emmagasinée dans le condensateur se partage, entre les branches du circuit, en deux parties inversement proportionnelles aux résistances. Bourguignon admet qu'il en est ainsi dans les conditions de son expérience, et mesurant, par une méthode balistique, les quantités d'électricité traversant chaque branche, connaissant, d'autre part, la valeur de la résistance métallique, il en déduit celle du corps humain. Il compare ensuite cette expression de la résistance cherchée à une autre déterminée par le procédé de Wertheim-Salomonson et observe que la première est toujours supérieure à la deuxième.

Il en conclut que la résistance opposée par le corps humain aux décharges de condensateur ne peut être connue qu'en utilisant les mêmes décharges par la méthode précédente, dont il fait un des temps de la détermination de la chronaxie.

A propos de ces expériences, il convient de faire quelques remarques. Tout d'abord, elles ont pour base un principe incertain et que nous sommes même fondé à croire inexact : c'est l'invariabilité de la résistance apparente du corps humain au cours de la décharge. Si, au contraire, elle se modifie au fur et à mesure que l'intensité diminue, la valeur trouvée n'est plus qu'un chiffre intermédiaire entre les valeurs maxima et minima. En même temps, un calcul fort simple permet de se rendre compte que, si l'on admet une baisse de la résistance apparente quand l'intensité augmente, la méthode de Wertheim-Salomonson conduit à des valeurs trop faibles de la résistance, ce qui contribue à augmenter l'écart observé entre les deux méthodes de mesure.

Les expériences de Bourguignon elles-mêmes prouvent d'ailleurs la variabilité de la résistance du corps humain, car il constate que le rapport des quantités d'électricité passant dans la branche du sujet et dans l'autre s'élève quand le potentiel augmente, ce qui ne peut s'expliquer que s'il y a une variation rapide de la résistance du sujet avec le voltage. A ce point de vue, le travail de Bourguignon apporte une

réponse assez satisfaisante au problème soulevé par l'« effet Fleischl ».

La même critique doit s'appliquer à tous les procédés qui emploient les décharges de condensateur pour la mesure de la résistance du corps humain, et notamment à celui préconisé par Cluzet [16], dans lequel on effectue deux déterminations de la capacité donnant le seuil d'excitation pour le minimum d'énergie libérée, une première fois avec le corps humain seul en circuit et une deuxième après avoir introduit une résistance additionnelle connue. En égalant, dans les deux cas, le produit de la résistance du circuit par la capacité correspondante, on obtiendrait une relation où tout est connu, sauf la résistance propre du sujet, dont on déduit facilement la valeur. Or, d'après Bourguignon, qui a appliqué ce procédé avec une évaluation un peu différente de la constante d'excitabilité, l'on trouve autant de valeurs de la résistance du corps humain que l'on exécute d'expériences avec des résistances intercalaires différentes.

En somme, les conditions physiques réalisées par les décharges de condensateur sont trop mal définies pour que l'on puisse explorer ainsi la conductibilité électrique des tissus.

La question de la résistance électrique et de la polarisation de l'organisme a été reprise récemment en Allemagne par Gildemeister [17] et ses élèves. Ces auteurs font une critique judicieuse des méthodes utilisées jusqu'à présent pour explorer la conductibilité des tissus.

Lorsque l'on mesure successivement la résistance aux courants galvanique et faradique, on n'est jamais sûr que l'augmentation apparente de résistance des tissus puisse être entièrement due à l'apparition d'une force électromotrice opposée à celle du courant. Il n'est pas illogique de supposer que la migration des ions, qui constitue le courant continu, puisse modifier la résistance vraie, indépendamment de toute polarisation. Nous savons même que, pour certains auteurs, dont Stéphane Leduc, le phénomène prédominant dans la conductibilité des tissus vivants serait une diminution de la résistance par pénétration progressive des ions dans certains milieux peu conducteurs. De même, la méthode qui consiste à évaluer la tension aux électrodes après le passage du courant (Wippen, méthode de Du Bois-Reymond, Hermann ou Hering) est passible de quelques critiques.

La mesure étant faite un temps assez long après le passage du courant, on peut craindre que la force électromotrice ne se modifie pendant cet intervalle. L'expérience, comme

nous aurons l'occasion de le montrer, justifie pleinement cette hypothèse.

Gildemeister en envisage une autre. L'ouverture du courant polarisant peut éveiller dans les tissus des forces électromotrices qui n'existeraient pas au cours du passage du courant. On sait que, pour le muscle, ces phénomènes sont très accusés et peuvent même masquer la véritable polarisation. D'où la conclusion de cet auteur qu'il faut mesurer, en même temps, la résistance aux courants galvanique et faradique pour pouvoir en déduire avec sécurité la force contre-électromotrice de polarisation.

Le principe de sa méthode est le suivant : tandis que l'on mesure la résistance au courant alternatif avec un pont de Kohlrausch, on fait passer dans la branche du sujet un courant continu qui ne trouble en rien la mesure susdite. Si on lit, en même temps, la position du curseur sur le fil du pont et l'intensité sur un galvanomètre mis en série avec le sujet, on a tous les éléments pour connaître la résistance vraie de l'organisme et la force contre-électromotrice de polarisation. Galler [18], appliquant cette technique sur la grenouille, constate que le courant galvanique est sans influence sur la résistance vraie du corps et en conclut que la faible conductibilité des tissus au courant continu doit être attribuée à une force contre-électromotrice que cet auteur évalue à 2 volts pour une tension extérieure de 8 volts. Le siège principal de cette polarisation se trouverait au niveau de la peau, car, chez un animal privé de son tégument, les résistances aux deux sortes de courant se rapprochent l'une de l'autre. Il en est de même après ébullition préalable, fait très intéressant qui montre que la polarisation n'est pas conditionnée uniquement par les particularités morphologiques des tissus.

Gildemeister reprit ces expériences sur l'homme, avec une technique un peu perfectionnée, pour augmenter la précision des mesures de la résistance du corps humain par la méthode de Kohlrausch. Il a compensé l'influence perturbatrice de la polarisation en mettant, en série du corps humain, un enroulement à self-induction variable qui rend, selon cet auteur, la perception du minimum d'intensité dans la diagonale du pont beaucoup plus nette. En même temps, il élevait la fréquence du courant alternatif pour atteindre le plus possible la résistance vraie. A cet effet, il employait soit une machine à courant alternatif, soit une lampe de Poulsen. Les fréquences les plus usitées ont été de 5000 à 6000, encore per-

ceptibles par le téléphone. Il s'est servi, également, d'un détecteur permettant l'usage d'un galvanomètre comme appareil de zéro ; un condensateur placé dans la diagonale du pont protégeait celui-ci contre le courant continu traversant le sujet. Avec ce dispositif, il a constaté, chez l'homme, l'existence d'une force contre-électromotrice de polarisation pouvant atteindre jusqu'à 6,6 volts. Pour des intensités croissantes, la tension de polarisation croît d'abord vite, ensuite plus lentement. Si le sujet a été déjà traversé par des courants continus, la résistance apparente et la force contre-électromotrice s'en trouvent abaissées.

Gildemeister a fait une application intéressante de sa méthode à l'étude du reflexe psycho-galvanique. Il a pu ainsi montrer que l'augmentation d'intensité du courant parcourant l'organisme, occasionnée par une excitation sensitive ou sensorielle, n'est pas due à un changement dans la résistance du corps humain, pas plus du reste qu'à un courant d'action des éléments cellulaires cutanés, car elle est indépendante du sens du courant. Il ne reste plus que l'hypothèse d'une diminution de la polarisation par l'intermédiaire du système nerveux qui accroîtrait la perméabilité aux ions des membranes cellulaires. Schwartz [19] reproduisit ces expériences sur la grenouille en remplaçant les excitations sensitivo-sensorielles par des excitations électriques portées sur les nerfs afférents au tégument, ce qui lui permit d'observer encore une diminution de la polarisation cutanée sans modification simultanée de la résistance vraie. Sous l'influence du système nerveux, il y a donc une augmentation de la perméabilité des membranes de cellules sécrétantes de la peau et peut-être aussi des cellules épidermiques. Ces vues concordent avec les conceptions de Höber [20] sur le rôle des ions dans les processus d'excitation.

Jusqu'à ces dernières années, les mesures de résistance des tissus n'ont été effectuées, à quelques exceptions près, qu'avec des courants de fréquence peu élevée. Philippson [21], utilisant comme générateur la lampe à trois électrodes si employée en T. S. F., explore, au contraire, la conductibilité de différents fragments d'organismes vivants pour des fréquences variant entre 500 à 3.000.000 périodes à la seconde.

Pour obtenir successivement et rapidement une gamme étendue de fréquences, l'auteur a employé le montage utilisé en radio-télégraphie pour les hétérodynes. Le rendement est augmenté par l'utilisation de trois lampes placées parallèlement.

Les capacités sont fournies par un condensateur étalon à fiches d'un microfarad de valeur totale, divisé en dixièmes, avec, en parallèle, un condensateur variable à air de 1,1 millièrne de microfarad. Les selfs sont constituées par une série de 4 bobines de self-induction interchangeables de 0,4, 0,6, 0,04, et 0,0125 millihenrys.

L'étalonnage des capacités nécessaires pour obtenir chacune des fréquences désirées avec un chauffage et un voltage uniformes est obtenu, soit par comparaison avec des diapasons pour les fréquences de 500 à 2000 par secondes, soit par l'emploi d'un contrôleur d'onde pour des fréquences supérieures.

La mesure des résistances se fait de la manière suivante : le générateur agit, par induction, sur un circuit secondaire de mesure, comprenant en série une bobine de self appropriée qu'on peut approcher ou éloigner de la bobine de l'éthérodyne, de manière à pouvoir régler l'intensité du courant de mesure.

La résistance du rhéostat de mesure et la résistance à mesurer étant placées en série, on pourra reconnaître qu'elles sont identiques, si un indicateur de tension alternative donne la même mesure lorsqu'il est placé, soit aux bornes du rhéostat, soit aux bornes de la résistance à mesurer. On réalise cette condition en agissant sur le rhéostat.

L'indicateur des tensions alternatives employé est le voltmètre amplificateur d'Abraham.

La construction du rhéostat demande quelques précautions pour éviter les causes d'erreur dues à la présence de capacité ou de self.

L'auteur pense y être arrivé par l'emploi d'un fil de manganine de 7/100^e de millimètre et un enroulement bifilaire sur un parallépipède de 20 centimètres de côté, avec un écart suffisant entre les spires pour éviter la formation de capacité. En résumé, l'appareil comprend trois parties : un générateur hétérodyne, un circuit de mesure et le voltmètre amplificateur. Un tel dispositif, d'après l'estimation de l'auteur, permettrait de mesurer les résistances des tissus à quelques ohms près.

Voici les conclusions auxquelles a été conduit Philipppson :

1° D'une manière générale, les membranes cellulaires se conduisent, vis-à-vis du courant alternatif, comme des capacités ;

2° La résistance de polarisation d'une membrane cellulaire est analogue à une résistance de capacité. Le courant

est décalé d'un quart de période en avant par rapport à la force électromotrice extérieure ;

3° Les tissus peuvent être assimilés, au point de vue électrique, à une résistance mise en série avec un condensateur, ce dernier étant lui-même shunté par une autre résistance ;

4° La première résistance serait la résistance spécifique du milieu cellulaire, la capacité serait formée par les membranes cellulaires constituées essentiellement de substances lipoïdes, qui sont un diélectrique plus ou moins parfait, séparant des milieux électrolytiques assez bons conducteurs.

Comme ces membranes ne sont cependant pas isolantes et présentent des solutions de continuité, on doit admettre que la capacité qu'elles forment est shuntée par une résistance qui représentera la résistance ohmique des membranes et des espaces intercalaires.

Philippson admet que les deux résistances, ainsi définies, sont constantes au moins en première approximation, mais que la capacité décroîtrait lorsque les fréquences vont en augmentant. Remarquons, en passant, que cette variation ne semble pas susceptible d'expliquer entièrement les faits observés avec les courants de durée variable (1).

Mais la diminution apparente de la capacité avec la fréquence nous paraît pouvoir être attribuée à la baisse de la résistance shuntant le condensateur, ce qui expliquerait la décroissance de la polarisation avec la durée de passage du courant.

Néanmoins, les hypothèses de l'auteur se trouvent cadrer assez bien avec ses déterminations de résistances et de capacités, qui varient avec la fréquence suivant les prévisions théoriques. Opérant sur du foie et du muscle de cobaye, ainsi que sur des tubercules de pommes de terre, cet expérimentateur a vu que la résistance diminuait constamment entre des fréquences de 10^2 à 10^8 par seconde. Cette diminution, d'abord lente pour les basses fréquences, deviendrait rapide entre 10^5 et 10^7 par seconde, pour se ralentir ensuite quand on atteint des fréquences plus grandes ; de telle sorte que les courbes représentant ces variations sont comprises entre une asymptote supérieure correspondant à la résistance nulle et une asymptote inférieure qui serait la résistance pour une fréquence infinie.

Ainsi, pour des muscles frais, la résistance spécifique, exprimée en ohms par centimètre, varie de 1600 environ pour

(1) Voir chapitre II.

une fréquence de 10^2 à une valeur voisine de 100 pour des fréquences de l'ordre de 10^8 .

L'altération des tissus se révélerait par une modification de cette courbe ; il en serait de même de la germination des pommes de terre, qui s'accompagnerait d'une diminution très grande de la résistance cellulaire par mobilisation des réserves salines, tandis que les constantes des membranes resteraient les mêmes. On pourrait ainsi analyser certains phénomènes de la vie cellulaire, comme les variations de perméabilité des membranes. Sans nous arrêter aux détails de la technique assez compliquée de Philippon, notons cependant la difficulté qu'il éprouve à rapporter les mesures de résistance à un élément de comparaison. Pour des fréquences aussi élevées, il n'existe pas de corps ayant une résistance fixe, indépendante de la rapidité des oscillations électriques. De simples fils de cuivre, à moins d'avoir un diamètre infiniment faible, ont une résistance qui croît avec la fréquence, la conductibilité se localisant de plus en plus à la surface du fil. Cet inconvénient ne peut même pas être évité en prenant comme résistance de comparaison des électrolytes, car, d'après Philippon, en plus de la self-induction de la cellule et de ses connexions, il y aurait une inertie des ions en solution qui agirait comme une self-induction d'origine électro-magnétique. Ainsi, une même solution de chlorure de potassium présente une résistance bien différente suivant la fréquence. Cette sorte de self-induction de l'électrolyte n'est d'ailleurs pas une fonction simple de la fréquence, mais elle passerait par un maximum pour 1.500.000 périodes à la seconde et diminuerait ensuite. Entre les fréquences de 1 à 3.000.000, elle semblerait être proportionnelle à la résistance ohmique de l'électrolyte, ce qui permettrait peut-être d'affecter les mesures de résistance des tissus d'un terme correctif, grâce auquel on obtiendrait la solution de chlorure de potassium de même réactance. On voit à quel point la question de la résistance du corps humain devient complexe lorsque l'on opère avec des courants de fréquences aussi élevées.

Aussi, malgré le très grand intérêt de ces recherches, estimons-nous qu'elles restent encore entourées d'un certain élément d'imprécision dû à notre manque de connaissances sur la conductibilité des électrolytes pour les oscillations électriques de fréquences élevées. Tant que cette dernière question n'aura pas été éclaircie parfaitement, nous croyons qu'il est dangereux d'appliquer des courants de cette nature à l'exploration électrique des tissus.

Enfin, depuis la publication de nos premières recherches sur la polarisation (1), a paru un important travail de E. David [22], dont les conclusions confirment les nôtres et que nous devons analyser. Cet auteur s'est proposé de mesurer, par la méthode d'opposition, la différence de potentiel qui existe entre les électrodes dès qu'a cessé le courant polarisant.

Pénétré de la nécessité de pratiquer la mesure dans un temps très bref, pour éviter que la force contre-électromotrice n'ait eu le temps de subir une baisse par trop importante, il a utilisé des appareils automatiques de trois types différents.

Le premier est un diapason donnant 50 oscillations par seconde, et dont l'une des branches met alternativement le sujet en relation, d'une part avec la source de courant, et d'autre part avec un réducteur de potentiel. A l'aide de cet appareil, David estime à $1/200^{\text{e}}$ de seconde l'intervalle écoulé entre la fin de la période de polarisation et le début de la mesure.

Le second appareil employé est un interrupteur rotatif constitué par un cylindre métallique dont la surface est séparée en deux régions isolées électriquement l'une de l'autre et sur lesquelles des balais viennent prendre contact. La fréquence ainsi réalisée est de trente à cinquante par seconde, avec un intervalle, entre la fin du courant polarisant et la mise en opposition des deux forces électromotrices, évalué à moins d'un quart de la période.

Avec ces dispositifs, David a obtenu des forces contre-électromotrices un peu plus élevées que celles obtenues avant lui par Weiss et Chanoz, mais encore assez faibles. Pour prendre un exemple : lorsqu'il augmente la tension polarisante de 2 à 12 volts, il observe que la force contre-électromotrice de polarisation passe de 1,11 à 4 volts.

Selon cet auteur, la force contre-électromotrice croîtrait avec la tension polarisante, mais seulement jusqu'à un certain maximum, au delà duquel elle diminuerait légèrement. De plus, quand, après avoir augmenté la tension polarisante de deux en deux volts, il la diminue de la même manière, il ne retrouve plus les mêmes chiffres qu'à l'aller, mais des valeurs sensiblement plus petites.

Etudiant l'influence de la durée de passage du courant,

(1) A. STROHL : Mesure de la force contre-électromotrice de polarisation chez l'homme. (*C. R. de la Soc. de Biol.*, t. LXXXV, p. 948, 1921.)

David constate que la force contre-électromotrice baisse quand celle-ci augmente.

Reprenant ensuite l'étude de l'action de la température sur le phénomène de la polarisation, déjà abordée autrefois par Hermann, il vérifie les conclusions de ce dernier relatives à l'augmentation de la force contre-électromotrice avec le froid.

Ces résultats ne sont pas à l'abri de toute critique. La rapidité des mesures est insuffisante, comme le prouvent les chiffres trouvés pour la polarisation, manifestement trop bas. En outre, ces techniques ont l'inconvénient de nécessiter une durée du passage du courant trop grande. L'influence de la durée du courant, qui tend à faire baisser la polarisation, vient se superposer à l'action due à l'augmentation de la tension extérieure et qui tend à l'élever. Ainsi s'expliquent et le maximum trouvé pour la polarisation en fonction de la tension polarisante et les chiffres trop faibles quand il revient aux voltages antérieurs.

La dernière des techniques employées par David est certainement bien meilleure. Elle consiste à se servir du pendule de Helmholtz pour manœuvrer les différents contacts nécessaires aux mesures. Cet instrument, très employé en Allemagne, où il a fait l'objet de nombreuses études, notamment de la part de M. Gildemeister et Otto Weiss, semble susceptible d'une grande précision. D'après David, après modification convenable de ce pendule et un réglage soigné, l'on pourrait abaisser la durée s'écoulant entre la fin du courant polarisant et la mise en opposition à $1/120.000^{\circ}$ de seconde, et réduire la durée de l'opposition elle-même à $1/6000^{\circ}$ ou $1/12.000^{\circ}$ de seconde.

Nous ne pensons pas que la clef de fermeture du circuit d'opposition employée par l'auteur, et qui est du même type que celle que nous avons expérimentée nous-même dans certaines expériences (voir chapitre II), soit capable d'un fonctionnement aussi précis. Il n'en est pas moins vrai qu'avec ce dispositif David est arrivé à obtenir des valeurs de polarisation qui se rapprochent beaucoup plus que les précédentes de la valeur vraie qui reste, dans cette méthode, une limite inaccessible. Il a pu, ainsi, trouver des forces contre-électromotrices de 8 à 9,5 volts pour une tension polarisante de 10 volts. Il a également montré comment une augmentation de quelques dix millièmes de seconde entre les deux phases de la mesure suffisait pour entraîner une baisse de plusieurs volts pour la polarisation.

En terminant, l'auteur s'est demandé si la force contre-électromotrice mesurée ne pouvait pas être due, en partie, à un phénomène de polarisation du métal des électrodes ou à un phénomène de condensation électrique et, grâce à des expériences de contrôle, effectuées sur un modèle schématique du corps humain, il arrive à cette conclusion que ces actions ne jouent qu'un rôle négligeable.

Dans un mémoire paru à la suite de celui-ci, Gildemeister montre la portée des expériences de David au point de vue de la théorie de la conduction de l'électricité par les tissus vivants. Nous aurons l'occasion, dans le chapitre que nous consacrons à cette question, d'examiner avec quelque détail les hypothèses émises par Gildemeister à ce sujet.

Ce rapide aperçu historique n'a pas la prétention d'avoir fait état de toutes les recherches effectuées dans un domaine aussi vaste.

Nous avons simplement voulu donner une idée des diverses orientations dans lesquelles se sont engagés les chercheurs et montrer les difficultés expérimentales rencontrées par nos devanciers, ainsi que les problèmes qui se posaient au moment où nous avons abordé cette étude.

CHAPITRE PREMIER

ÉTUDE DE LA CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE POUR DES COURANTS DE FAIBLE DURÉE

C'est en étudiant l'application à l'homme de la nouvelle méthode d'exploration électrique des nerfs et des muscles, basée sur la notion de la *chronaxie* de Lapicque (1), que nous avons été amené à nous occuper de la conductibilité du corps humain pour les courants de faible durée.

En effet, la détermination de la chronaxie n'est possible que si la forme du courant excitateur est rigoureusement déterminée, c'est-à-dire si l'on sait quelle est l'intensité aux différents moments du passage du courant. Or, les travaux des électro-physiologistes contemporains nous ont appris que le processus d'excitation se développait avec une très grande vitesse dans le nerf ou le muscle et était terminé après une durée qui, pour les muscles squelettiques des mammifères, est de l'ordre de quelques millièmes de seconde. Ce qui importe donc de savoir, au point de vue de l'exploration électrique, c'est la manière dont se comporte la résistance du corps pendant les premiers millièmes de seconde qui suivent la fermeture du circuit. A ce sujet, les données expérimentales font défaut et nous avons eu l'occasion de montrer dans la

(1) Nous ne référons pas ici l'historique de la question de l'excitabilité électrique des nerfs et des muscles, qui a été fort bien exposé dans un grand nombre de travaux. Parmi ceux-ci, nous signalerons :

G. WEISS : Sur la possibilité de rendre comparables entre eux les appareils servant à l'excitation électrique. (*Archives ital. de Biol.*, t. XXXV, fasc. III, pp. 413-452, 1901.)

M. LAPICQUE : *Recherches sur l'excitabilité électrique de différents muscles de vertébrés et d'invertébrés*. Thèse Fac. Sciences, Paris, 1905.

J. CLUZET : *Loi d'excitation des nerfs par décharge de condensateur*. Thèse Fac. Sciences, Paris, 1905.

H. LAUGIER : *Vitesse d'excitabilité et courants induits*. Thèse Fac. de Médecine, Paris, 1913.

L. LAPICQUE : Principe pour une théorie du fonctionnement nerveux élémentaire. (*Revue générale des Sciences*, t. 21, pp. 103-117, 1910.)

première partie que les recherches qui ont été entreprises dans cette voie manquent de rigueur.

Les durées de passage des courants effectués à la main ou avec les interrupteurs en usage dans les laboratoires de physiologie sont beaucoup trop longues pour le but qui nous intéresse et, d'autre part, les galvanomètres ordinaires ont une inertie beaucoup trop grande pour donner des indications exactes sur l'intensité du courant pendant la durée d'excitation.

Il fallait donc, d'une part, avoir à sa disposition un interrupteur capable de fournir des ondes d'une durée correspondante aux phénomènes physiologiques de l'excitation, et, d'autre part, évaluer les intensités à l'aide d'un instrument sensible à des courants aussi brefs.

Depuis que la durée a été reconnue comme un des facteurs les plus importants de l'excitation électrique, on a réalisé de nombreux dispositifs mécaniques permettant d'obtenir des ondes très courtes. Rappelons brièvement la technique avec laquelle Weiss [23] a effectué ses recherches sur la loi de l'excitation électrique des nerfs. Elle consistait à rompre successivement deux fils à l'aide d'une balle lancée par une carabine à acide carbonique liquide et dont la vitesse étalonnée était de l'ordre de 100 mètres à la seconde. La première de ces ruptures supprimait une dérivation placée sur les électrodes et provoquait, de ce fait, le début du passage du courant. La deuxième rupture, interrompant le circuit général, faisait cesser le courant.

Vu la vitesse dont est animé l'organe mobile, on conçoit que l'on peut, de cette manière, produire des courants électriques de l'ordre du 10.000^e de seconde. Ce procédé, d'une grande précision, a l'inconvénient de nécessiter une installation spéciale et de ne pas se prêter à des mesures rapides.

D'autres appareils ont été utilisés pour produire des ondes d'excitation d'une durée suffisamment brève. Parmi ceux-ci, un des plus connus est le pendule de Helmholtz, fort employé en Allemagne, aussi bien dans les laboratoires de physique que dans ceux de physiologie. Mentionnons également le pendule de Keith-Lucas [24], qui, comme son nom l'indique, est un balancier pesant, mobile autour d'un axe horizontal. Dans son mouvement d'oscillation sous l'influence de la pesanteur, l'extrémité du pendule heurte et ouvre successivement deux contacts électriques. On peut obtenir ainsi des temps de passage de 3 à 100/1000^{es} de seconde.

Le chronaximètre de Lapicque [25] est un rhéotome rotatif

composé d'une aiguille horizontale qu'un poids, tombant d'une petite hauteur, entraîne avec une vitesse croissante, grâce à l'ingénieux dispositif d'une poulie à rayon décroissant. Cette aiguille ferme et ouvre successivement le circuit d'une batterie de piles ou d'accumulateurs et produit ainsi des ondes de durée variable entre $1/10^{\circ}$ et une fraction de 1000° de seconde.

Cet instrument a le mérite d'avoir introduit en clinique la mesure de la chronaxie par les courants à voltage constant; construit pendant la guerre et spécialement pour l'examen des blessés des nerfs chez lesquels on observe des valeurs élevées de la chronaxie, il a certainement rendu de grands services en neurologie de guerre. Il peut être employé aussi très utilement pour explorer l'excitabilité de certains tissus qui n'ont pas un fonctionnement très rapide ou pour apprécier le temps utile (1) des muscles de l'homme.

Toutefois, dès qu'on descend à des intervalles de l'ordre du 10.000° de seconde, l'exactitude de cet appareil n'est plus suffisante pour des mesures précises.

L'EGERSIMÈTRE. — Nous nous sommes servi, pour cette étude, d'un appareil que nous avons fait construire pour l'exploration électrique des muscles et des nerfs de l'homme, et auquel nous avons donné pour cette raison le nom d'égersimètre (2).

Son principe est des plus simples (fig. 1). Une masse pesante M , tombant d'une hauteur de 18 centimètres environ, rencontre deux leviers L_1 et L_2 , qui basculent sous le choc, et rompent ainsi les contacts électriques A et B . La masse est guidée dans sa chute par une colonne centrale C , dont la verticalité est contrôlée au moyen d'un niveau d'eau et au contact de laquelle elle glisse sans jeu et presque sans frottement, grâce à un alésage soigné de la masse et à une rectification minutieuse de la tige C . La masse repose à l'extrémité supérieure de la colonne sur deux saillies métalliques S , qui peuvent s'effacer par l'action d'une pédale P , située à la partie inférieure de l'appareil, en provoquant de la sorte la chute du poids. Au bas de sa course, celui-ci s'engage dans un cylindre creux D , qui sert d'amortisseur à air pour étouffer le bruit et l'ébranlement au cours du fonc-

(1) On dénomme ainsi, avec Lapicque, la durée minima pendant laquelle doit passer un courant continu qui excite le muscle avec la plus petite intensité possible.

(2) Du grec *εγερσις* (excitation).

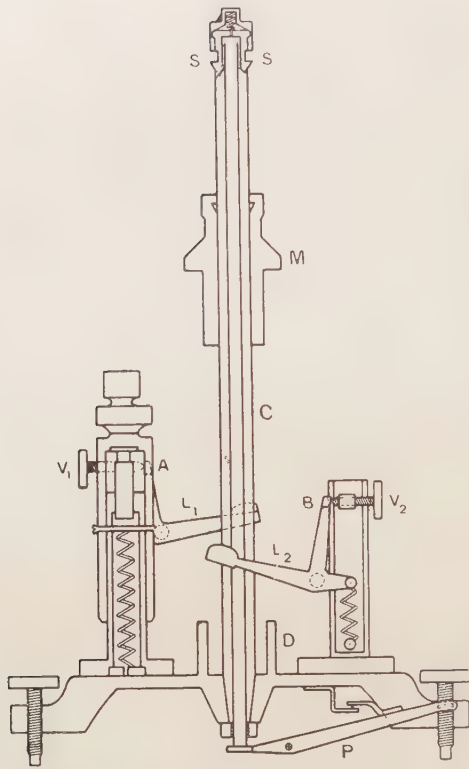


FIGURE 1.
Dessin demi-schématique de l'égersimètre.

tionnement. L'axe du levier inférieur L_2 est fixe, celui du levier supérieur L_1 est solidaire d'une vis micrométrique qui permet d'en faire varier la hauteur d'une quantité connue. L'écrou dans lequel tourne cette vis porte à sa base une graduation en millimètres. La tête de la vis est divisée en vingt parties, et l'on peut, à l'estime, évaluer facilement le quarantième de millimètre. Un ressort de rappel applique la branche verticale de chaque levier contre l'extrémité de deux vis V_1 et V_2 dont la rotation déplace l'extrémité libre du levier. Cette manœuvre, comme nous le verrons, est utilisée pour le réglage du zéro de l'appareil.

Montage (Fig. 2). — La source de courant était constituée dans ces expériences par une batterie de 80 piles Fery grand modèle, divisée en quatre sections. Le collecteur C , qui permet de prendre un nombre quelconque de ces sections, inter-

cale en même temps une série de résistances calculées de telle sorte que l'on puisse obtenir, par le jeu du réducteur de potentiel R , toutes les valeurs du potentiel jusqu'au maximum que peut fournir la batterie, sans que le débit n'atteigne jamais une valeur trop grande dans la résistance R .

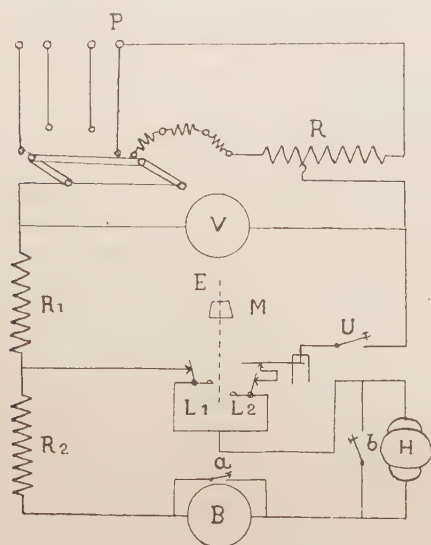


FIGURE 2.

E , égersimètre. — C , collecteur. — R , réducteur de potentiel. — V , voltmètre.
— R_1 , R_2 , résistances étalonnées. — B , galvanomètre balistique. —
 H , corps humain. — V , voltmètre.

Le courant qui vient de la source passe d'abord dans une première résistance R_1 , puis se divise en deux branches. L'une comprend les deux leviers et revient au pôle — par la pédale U . L'autre traverse une résistance métallique R , un galvanomètre balistique de Carpentier B et le corps humain H . Elle rejoint la première entre les deux leviers de l'appareil à chute. Quand les deux contacts commandés par les leviers sont fermés, la dérivation ainsi constituée absorbe la presque totalité du courant, qui ne traverse le corps humain que sous une intensité très faible. Quand le premier levier est rompu, le courant commence à passer sous voltage

constant dans le sujet, et il est rompu à l'ouverture du deuxième levier.

De cette manière, comme dans le réothome balistique de Weiss, le début du passage du courant est réalisé en rompant un contact, ce qui est la meilleure manière d'obtenir le début à un moment exactement déterminé. Ajoutons qu'un voltmètre V permet de connaître la différence de potentiel de la source et que deux shunts a et b permettent, l'un de ramener le galvanomètre balistique au zéro, l'autre d'exclure le sujet du circuit.

Fidélité. — La première des qualités que doit posséder tout appareil de mesure est de donner des résultats identiques quand les conditions expérimentales restent les mêmes. A ce point de vue, notre appareil nous a donné toute satisfaction. On peut s'en assurer soit au moyen d'un oscillographe, avec lequel on inscrit le début et la fin du passage du courant, soit à l'aide d'un galvanomètre balistique qui indique quelle quantité d'électricité traverse le circuit d'utilisation pour un écart donné entre les leviers.

Il est bien évident que si la durée qui s'écoule entre le jeu des deux leviers reste la même au cours de plusieurs émissions de courant, les élongations du galvanomètre balistique devront être constantes.

A titre d'exemple, nous donnons ci-dessous les chiffres obtenus par ce procédé pour deux positions différentes du levier mobile ; une de ces positions correspondant à un écart nul, c'est-à-dire au choc simultané des deux leviers par la masse, l'autre à un écart de 0,25 millimètres.

TABLEAU I

Voltage de la source : 40 v. ; $R_1 = 1000$ ohms ; $R_2 = 7000$ ohms.				
Numéros des mesures	Ecart des leviers en millimètres	Déviation du galvanomètre	Ecart des leviers en millimètres	Déviation du galvanomètre
1	0	6	0,25	21
2		5,5		21,5
3		6,5		21,5
4		5,5		21
5		6		22
6		6		22
Moyennes... ..		5.8		21,5

Les déviations du galvanomètre correspondant à l'écart

zéro des leviers sont produites par la faible quantité d'électricité qui traverse la dérivation contenant l'appareil, avant l'ouverture du premier contact. Il faut les retrancher des élongations observées pour l'écart 0,25 si l'on veut avoir des nombres qui représentent, en unités arbitraires, les quantités d'électricité mises en jeu entre les deux ruptures des contacts.

On voit que ces quantités ne diffèrent les unes des autres, au maximum, que des six centièmes de leurs valeurs. Si l'on considère le degré de précision des lectures, on ne peut espérer démontrer mieux la fidélité de l'instrument.

Réglage du zéro. — C'est la partie la plus délicate du maniement de l'appareil, tout au moins lorsqu'on veut obtenir le maximum de précision qu'il est susceptible d'atteindre. Ce réglage consiste à fixer le levier inférieur L_2 à une hauteur telle que la différence de niveau entre les points où les leviers sont frappés par la masse M corresponde bien à la longueur lue sur la graduation, ce qui revient à déterminer quelle position doit occuper L_2 pour que les deux leviers soient heurtés simultanément lorsque la vis micrométrique se trouve au zéro de sa graduation.

Pour rechercher avec quelle précision l'on pouvait effectuer ce réglage, nous avons muni la vis V_2 d'un index de 86 millimètres de longueur qui, par rotation de cette vis, se déplace sur un cadran divisé en arcs de 1 centimètre.

Chaque déplacement de l'index d'une division correspond alors à une rotation de $6^{\circ}40'$ ou, puisque le pas de la vis est de 0,9, à une avancée de 0,0166 m/m. de celle-ci. Comme le rapport des longueurs des deux branches du levier est de 1,23, l'extrémité libre se déplacera de 0,020 millimètre pour une rotation d'une division.

TABLEAU II

Voltage : 20 v. ; $R_1 = R_2 = 6000$ ohms.

Positions de l'index	Variations de hauteur du levier en millimètres	Déviation du galvanomètre
—	—	—
1		8
2	0,02	5,8
3	—	4,5
4	—	4
5	—	4
6	—	4

Nous avons alors observé, avec un galvanomètre Deprez-d'Arsonval, quelles quantités d'électricité passaient dans le circuit pour différentes positions de l'index (1).

Les chiffres inscrits dans ce tableau montrent que les quantités d'électricité décroissent progressivement si le sens de rotation correspond à un abaissement du levier, jusqu'à une certaine hauteur de ce dernier au-dessous de laquelle elles restent sensiblement constantes. Tant que la quantité d'électricité émise diminue, c'est que le contact *A* (fig. 1) est rompu avant *B*. A un certain moment, les deux leviers sont frappés simultanément, et il ne passe dans le balistique que la petite quantité d'électricité qui traverse le circuit dérivé entre l'instant où se ferme la pédale et celui où se coupe le circuit en *B*. Cette même quantité continue à passer alors que le levier *L*₂ est au-dessus de *L*₁. Par conséquent, la graduation pour laquelle la quantité d'électricité augmente indique la position du zéro de ce levier. Cette position peut être déterminée facilement à moins de 0,02 près, ce qui correspond à une durée de l'ordre du 100.000^e de seconde.

Etalonnage. — Il consiste à évaluer les durées de passage des courants émis pour les divers écarts des clefs. Cet étalonnage a été effectué en inscrivant, à l'aide d'un oscillographe dont le film a une vitesse de translation connue, le début et la fin des courants produits. On constate que, jusqu'à un écart d'environ 5 millimètres, le temps écoulé entre les chocs des leviers est à peu près proportionnel à cet écart, un millimètre correspondant à $5,2 \times 10^{-4}$ secondes. Pour des distances plus grandes, la courbe qui représente les durées en fonction des différences de hauteur des leviers devient concave vers l'axe des temps, comme l'exige la loi de la chute des corps (fig. 3).

L'écart minimum pour lequel on a mesuré la durée à l'oscillographe est de 0,2 m/m. Il correspond à un 1/10.000^e de seconde.

Au-dessous de cette valeur, on pourra admettre avec une grande approximation la proportionnalité entre les durées et les écartements. L'écart maximum des clefs, 20 millimètres, correspond à une durée d'un peu plus de 1/100^e de seconde. Pour pouvoir produire des courants d'une durée plus grande, nous avons fait construire une masse différente, plus longue, de telle sorte que la hauteur de chute de la partie qui entraîne

(1) Pour augmenter la précision du réglage, nous utilisons un galvanomètre non balistique, d'une grande sensibilité.

les leviers soit moindre. L'étalonnage de l'appareil muni de cette masse est représenté par la courbe inférieure de la figure 3. On arrive ainsi à réaliser des courants d'une durée de $6/100^{\text{es}}$ de seconde.

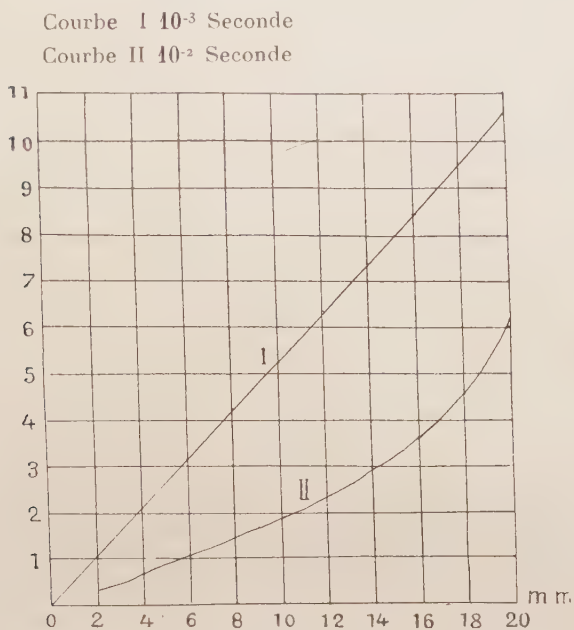


FIGURE 3.

*Courbes des durées de passage de courant
 en fonction de l'écartement des leviers de l'égersimètre.*

I. Petite masse. — II. Grande masse.

En terminant cette description, ajoutons que nous nous sommes assuré que le réducteur du potentiel et les résistances employées n'avaient qu'une self négligeable. La seule self que l'on ait à considérer, dans le circuit, est celle du galvanomètre, et nous verrons plus loin comment nous avons essayé d'en tenir compte.

Conduite des expériences. — Nous avons dû faire subir une légère modification à notre appareil pour réduire au minimum le courant, extrêmement faible d'ailleurs, qui traverse le corps humain avant la rupture du premier contact. Si, en

effet, ce courant est dépourvu de toute action physiologique, nous avons vu que son action sur le galvanomètre n'est pas négligeable, le temps relativement long pendant lequel il agit compensant la petitesse de son intensité.

Le mouvement du galvanomètre balistique est donc une résultante de ce courant dérivé et du courant passant entre les deux ruptures.

On pourrait, semble-t-il, obtenir une mesure correcte de la quantité d'électricité émise en soustrayant de l'élongation totale du galvanomètre celle qui est relative à la position de zéro du levier mobile ; mais on est ainsi amené à faire la différence de deux chiffres du même ordre de grandeur, dont le plus petit est affecté d'une erreur assez forte due à l'incertitude du moment où la pédale de l'appareil ferme le circuit. Il est préférable que le circuit général soit fermé automatiquement juste avant la rupture de la dérivation. A cet effet, nous avons construit une clé de fermeture actionnée par la chute de la masse de l'égersimètre. Elle consiste simplement (fig. 2) en une longue lame métallique très flexible L , dont une extrémité est encastrée, tandis que l'autre, libre, rencontrée par la masse en mouvement, se plie, sans opposer cependant, ainsi que nous nous en sommes assuré, aucun ralentissement appréciable à la vitesse de chute. Pour un certain degré de déformation de la lame, il se produit un contact entre deux pièces métalliques dont l'une est solidaire de celle-ci et placée près de l'extrémité fixe et l'autre, immobile, est située au-dessous.

Mentionnons que la manière même dont s'effectue le contact par flexion élastique empêche les phénomènes de rebondissement qui se produisent entre deux masses métalliques en mouvement rapide et qui rendent si incertain le moment de la fermeture du circuit. On conçoit qu'il est facile de régler la position de la lame de telle sorte que la fermeture du circuit général précède de très peu l'ouverture de la dérivation et qu'on arrive, de cette manière, à réduire la durée du courant dérivé et à diminuer l'importance de l'erreur commise sur son évaluation.

Dans le circuit d'utilisation (fig. 2) se trouve, outre le galvanomètre balistique Carpentier B , ayant une résistance de 436 ohms environ, une boîte de résistances étalonnées R_2 , pouvant donner 11,110 ohms et le corps humain H . Nous avons utilisé trois sortes d'électrodes. Les unes étaient constituées par des bâtons de zinc plongeant dans une solution saturée de sulfate de zinc contenue dans un petit vase poreux.

Le tout baignait dans une solution d'eau salée, au titre physiologique, dans laquelle le sujet trempait chacune de ses mains. Nous nous sommes servi, le plus souvent, des électrodes au chlorure d'argent du modèle de Bourguignon, et parfois d'électrodes spongieuses ordinaires. Dans ces deux derniers cas, pour nous rapprocher le plus possible des conditions habituelles de l'électro-diagnostic, nous utilisions une grande électrode indifférente et une plus petite en forme de bouton de 3 centimètres de diamètre environ. La première était placée sur le dos ou la racine du membre examiné, la seconde sur le point moteur d'un des muscles du membre. Nous n'avons pas tardé à nous apercevoir que le genre d'électrodes n'avait aucune influence notable sur l'allure du phénomène observé ; aussi, la plupart de nos expériences ont-elle été faites avec les électrodes de Bourguignon qui nous servent ordinairement pour nos examens électriques.

I. — EXPERIENCES PRELIMINAIRES

Dans nos premières expériences, nous nous sommes proposé de rechercher si la résistance du corps humain varie rapidement avec le voltage, comme semblent le prouver les expériences du Gaertner et de Bourguignon. Nous avons, pour cela, opéré de la manière suivante :

Le sujet étant en place et les électrodes fixées par des liens élastiques, on réglait le voltage de la source à l'aide du collecteur *C* et du réducteur de potentiel *R*, ainsi que l'écart des leviers, au moyen de la vis micrométrique, de manière à obtenir une durée de passage assez courte de 2 à $3/10.000^{\text{es}}$ de seconde. Puis on lisait les élongations du galvanomètre balistique pour des voltages différents.

Voici les résultats auxquels nous sommes parvenus :

1° Pour des émissions successives de courant à voltage constant, la résistance ne change pas d'une manière appréciable, ainsi que le montre le tableau ci-dessous.

Nous avons constaté également, au cours de mesures faites avec des voltages et des durées variables, que l'on retrouve sensiblement les mêmes chiffres quand on revient aux durées et voltages initiaux.

Il n'en est plus de même quand on fait passer un courant à la main, c'est-à-dire avec une durée de l'ordre de la

seconde. On voit alors la conductibilité du corps humain rester modifiée notablement pendant un certain temps. Aussi, dans nos expériences, avons-nous évité autant que possible la production de tels courants.

TABLEAU III

95 volts ; Résistances additionnelles : 20.000 ohms ;
Durée de passage : 0,0003.

Numéro des lectures	Elongation du galvanomètre
—	—
1	39,5 m/m.
2	40 —
3	41 —
4	40,5 —
5	40,5 —

2° Quand on double le voltage, la résistance du corps humain diminue et cette diminution est sensible, même pour des durées de passage de l'ordre du 10.000^e de seconde.

3° La diminution de résistance a varié, dans ces conditions, entre 1 et 3/10^{es} de la valeur initiale.

Mais, quand nous avons voulu étendre nos recherches à des courants de durées plus longues, nous nous sommes aperçu que le rapport des résistances, pour des durées égales et des voltages différents, variait suivant la longueur du courant considéré, ce qui indiquait une modification rapide de l'intensité avec le temps. Nous avons repris alors la question d'un point de vue plus général.

II. — MESURE DE LA RESISTANCE APPARENTE AUX DIFFERENTS MOMENTS DU PASSAGE DU COURANT

Nous allons, tout d'abord, supposer que les variations observées dans l'intensité du courant sont dues uniquement à des variations de la résistance du corps humain, et nous allons chercher quelles valeurs on devrait attribuer, à chaque instant, à cette résistance, pour rendre compte des faits observés.

Nous sommes ainsi conduit à définir ce que l'on peut appeler la *résistance apparente* du corps humain. Nous examinons

rons ensuite la question de savoir s'il n'existe pas d'autres hypothèses plus vraisemblables pouvant donner une explication satisfaisante des phénomènes décrits.

Nous avons d'abord construit les courbes d'intensité en fonction du temps de la manière suivante. Après avoir obtenu la courbe des quantités en fonction des temps, en portant sur un graphique, en ordonnée les indications du galvanomètre et en abscisse les durées, on prend en chaque point le coefficient angulaire de cette fonction et on étudie ses variations avec le temps. On a ainsi une deuxième courbe, celle des intensités.

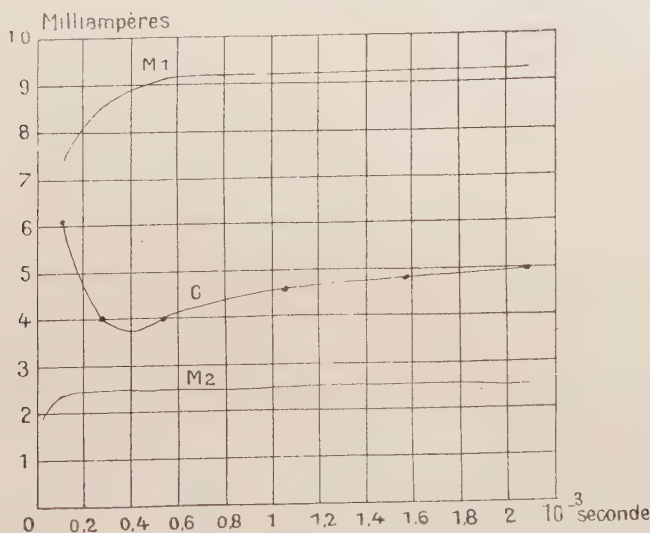


FIGURE 4.

Courbes des intensités en fonction du temps.

M_1 , circuit métallique de 4300 ohms.

M_2 , circuit métallique de 15.000 ohms.

C , circuit contenant une résistance métallique de 1500 ohms et le corps humain.

Nous reproduisons, sur la figure 4, trois courbes d'intensité dont deux, M_1 et M_2 , sont relatives à un circuit entièrement métallique et l'une, la courbe C , correspond au cas où le courant traverse le corps humain. (Voir tableau IV.)

On est tout de suite frappé par la différence d'allure de ces deux sortes de courbes. Quand le circuit ne comprend

que des résistances ohmiques, on voit l'intensité s'élever progressivement, à cause de la self du galvanomètre, et atteindre asymptotiquement une valeur constante. Il est à noter que la vitesse d'établissement du courant est moindre pour la courbe M_1 que pour la courbe M_2 , ce qui est dû à ce que, dans le premier cas, il y a moins de résistance dans le circuit, ce qui rend la constante de temps plus grande que dans le deuxième.

Par contre, quand le courant passe à travers les tissus, on voit l'intensité décroître très rapidement, passer par un minimum, puis croître de nouveau de plus en plus lentement.

Si le circuit, aux extrémités duquel agit la force électromotrice E et qui est parcouru par un courant d'intensité I , était dépourvu de self-induction, rien ne serait plus facile que de connaître, à chaque instant, la résistance apparente à l'aide de la loi d'Ohm.

Malheureusement, dans le cas où nous opérons, si le corps humain et les résistances additionnelles n'ont qu'une self absolument négligeable, le galvanomètre, qui comporte une bobine oscillant entre des masses de fer doux, a un coefficient de self-induction assez élevé. Nous devons alors appliquer la relation fondamentale des circuits doués de self :

$$(1) \quad E = RI + L \frac{dI}{dt},$$

où L représente le coefficient de self-induction.

La valeur du coefficient de self-induction du galvanomètre devant, *a priori*, être variable suivant l'intensité du courant qui traverse cet appareil, nous avons tout d'abord construit les courbes des quantités en fonction du temps, pour les valeurs suivantes de la résistance du circuit : 1.500, 2.000, 3.000, 4.000, 5.000, 6.000, 8.000, 12.000, 15.000 ohms (auxquelles il faut ajouter celle du galvanomètre : 436 ohms), en maintenant la force électromotrice toujours égale à 40 volts.

En possession de ces courbes, nous en avons déduit celles de l'intensité de la manière indiquée précédemment. Les courbes M_1 et M_2 de la figure 3 représentent deux de ces courbes. Appliquant alors à chacune d'elles la relation (1), pour différentes valeurs du temps, nous avons obtenu une série de valeurs pour L :

Voici quelques-unes des valeurs trouvées :

TABLEAU IV

<i>I</i> en ampères	<i>L</i> en henrys
0,0150	0,2
0,0090	0,23
0 0074	0,26
0 0042	0,33
0,0022	0,4
0,0012	0,45
0,0005	0,48

Lorsque nous voudrions utiliser la formule (1) pour en tirer *R*, nous devons choisir d'après le tableau précédent, ou mieux d'après une courbe de *L* en fonction de *I* que nous avons construite, la valeur du coefficient de self correspondant à l'intensité observée.

Ceci d'ailleurs suppose, ce qui n'est pas rigoureusement exact, que *L* ne dépend que de l'intensité au moment considéré et non des états antérieurs du champ.

Etant en possession de la valeur de *L*, rien n'est maintenant plus facile que de calculer *R*, en partant de la relation (1) qui donne :

$$(2) \quad R = \frac{E - L \frac{dI}{dt}}{I},$$

expression dans laquelle on remplace *I* et $\frac{dI}{dt}$ par leurs valeurs déduites de la courbe des quantités, comme il a été indiqué plus haut.

Il est à remarquer que si *E* est connu avec toute la précision désirable, si *I* déduit graphiquement de la courbe des quantités présente une approximation encore assez bonne,

le produit $L \frac{dI}{dt}$ comporte des déterminations pour lesquelles on ne peut compter que sur une exactitude faible.

Néanmoins, l'erreur, toujours assez forte, commise sur ce produit est peu importante, d'abord parce que la valeur de ce terme est en général petite devant *E*, de plus, parce que, quelle qu'elle soit, cette erreur n'affecte pas les valeurs maximum et minimum de *R*, qui sont les plus intéressantes à considérer. Lorsque les variations de *I* sont faibles, comme au voisinage du minimum, il serait illusoire de vouloir les

évaluer par la méthode graphique ; aussi avons-nous pris alors comme valeur de l'intensité la différence des quantités relatives à deux durées successives divisée par l'intervalle correspondant.

Nous n'avons d'ailleurs pas la prétention d'avoir réalisé ainsi une mesure de la résistance du corps humain à quelques ohms près. Cela n'aurait eu, au surplus, aucun intérêt. Mais nous pensons avoir donné une notion assez exacte de ses variations dans un intervalle pour lequel nous ne possédions jusqu'ici aucune donnée.

TABLEAU V

Grande électrode dans le dos, petite sur le jumeau externe.

Résistances additionnelles : 1900 ohms.

Mesure des résistances apparentes.

Durée en 10-3 secondes	20 volts			40 volts			80 volts		
	Q	I	R	Q	I	R	Q	I	R
			4.790			4.660			3 814
0,1	14,4	2,9	6.424	28,8	6,1	5.461	58,5	14	3.700
0,26	25,2	1,3	15 469	53,7	4	8.430	138,6	15	3 385
0,52	30,5	0,47	42.185	90,4	4	8.100	288,5	16	3 079
0,78	34,4	0,37	52.708	132,5	4,4	7.801			
1,04	37,8	0,36	53.695	175,8	4,6	6.774			
1,56	44,6	0,38	50.336	265	4,8	6.408			
2,08	58,5	0,39	48.880	359	5	6 085			
Environ 3 secondes		1,5	11.100						

Dans le tableau ci-dessus, Q représente les elongations du galvanomètre, I l'intensité en milliampères, R la résistance apparente du sujet et des électrodes obtenues en retranchant de la résistance totale calculée les résistances additionnelles et celles du galvanomètre.

Le premier chiffre de la colonne des résistances exprime une limite supérieure de la résistance au moment de la fermeture du circuit. Voici comment nous y sommes arrivé. Prenons comme exemple le cas précédent et considérons la courbe C de la figure 2 qui reproduit les intensités pour une tension de 40 volts. Nous voyons que dès 0^s,0001 la courbe décroît. Comme elle est partie de 0, elle a certainement passé par une valeur supérieure à 6^{mA} et, cette valeur étant un maximum, sa tangente était à ce moment horizontale. Supposons que ce maximum soit le chiffre que nous avons obtenu pour 0^s,0001 et calculons la résistance à l'aide de la formule

2 dans laquelle nous ferons $\frac{dI}{dt} = 0$. Nous trouvons un nombre

que nous appellerons désormais, pour abrégé, mais d'une manière impropre, la *résistance initiale* du corps humain.

Pour la durée approximative de trois secondes, la mesure de résistance a été faite avec un milliampère par la méthode de substitution. Ce qui frappe tout d'abord en considérant la traduction graphique des résultats du tableau V (fig. 5),

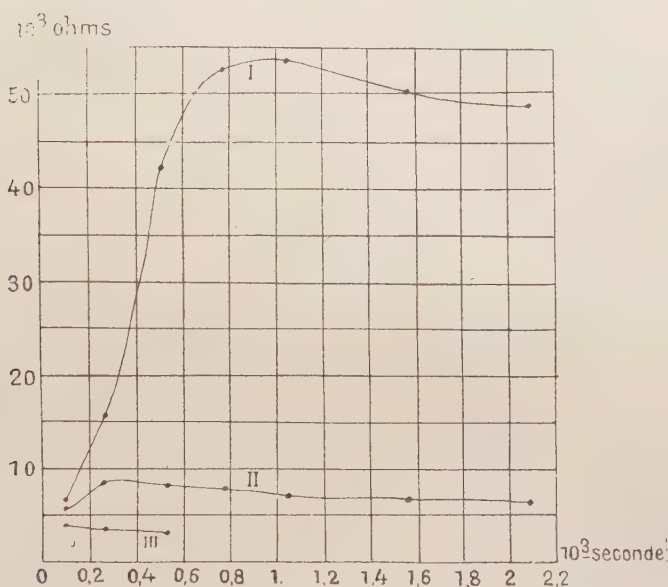


FIGURE 5.

Courbes des résistances apparentes du corps humain en fonction du temps.

- I. Différence de potentiel de 20 volts.
 II. — — — 40 —
 III. — — — 80 —

c'est l'accroissement considérable que subit la résistance apparente de l'organisme dans les premiers instants qui suivent la fermeture du circuit pour une différence de potentiel de 20 volts. C'est là un fait général que nous avons retrouvé dans toutes nos expériences. Après avoir atteint

un certain maximum, la résistance décroît, d'abord rapidement, puis plus lentement, et nous savons que cette décroissance se poursuit pour des durées très longues de l'ordre de la minute. La valeur maxima atteinte, ainsi que sa position dans le temps, dépend du voltage utilisé. Plus celui-ci est élevé, moins les variations de la résistance présentent d'amplitude, et plus le maximum se rapproche de l'origine.

Si l'on considère à chaque instant les résistances apparentes pour deux voltages différents, on voit que la résistance la plus basse correspond toujours à la différence de potentiel la plus forte et que la différence entre ces deux grandeurs, ainsi que leur rapport, croît, en général, avec la durée. Toutefois, cette augmentation ne se poursuit pas toujours pour des durées de l'ordre de la seconde.

L'influence de la grandeur des résistances additionnelles nous a paru agir en retardant l'apparition du maximum, contrairement, par conséquent, à une augmentation du voltage.

Naturellement, tout en gardant la même allure générale, les courbes varient dans le détail et dans l'amplitude, suivant la région du corps considérée et suivant les sujets, mais jusqu'ici nous n'avons pu dégager aucun facteur qui ait une action aussi nette que le voltage et la résistance.

Rappelons ici ce fait précédemment indiqué que le passage prolongé d'un courant modifie d'une manière durable la résistance électrique des tissus. Il y a là une cause de perturbation impossible à éviter si l'on veut connaître la résistance pour des courants de longue durée, dont l'influence peut se faire sentir pendant un temps assez long, et qui modifie les courbes de résistances obtenues ultérieurement pour la même région de l'organisme.

Il était légitime de se demander si les variations importantes constatées dans la résistance du circuit n'avaient pas leur siège au moins en partie aux électrodes. Nous avons vu que celles-ci avaient été tenues pour responsables de la baisse de résistance avec le voltage dans l'« effet Fleischl ».

Aussi, avons-nous cru utile d'étudier spécialement à ce point de vue les électrodes au chlorure d'argent dont nous nous servions. Voici, consignés dans le tableau VI, les résultats déduits d'une série d'expériences analogues aux précédentes, dans lesquelles les électrodes étaient mises directement en contact.

TABLEAU VI
Résistances additionnelles : 9500 ohms.

Durées en 10-3 secondes	DIFFÉRENCES DE POTENTIEL :			
	20 v.		40 v.	
	Résistance totale	Electrodes	Résistance totale	Electrodes
0,1	10.000	100	10.428	528
0,26	9.972	72	10.319	419
0,52	10.400	500	10.050	150
0,78	10.463	563	10.000	100
1,04	10.468	568	9.975	75
1,56	10.050	150	10.000	100
2,08	10.050	150	9.756	
2,6	10.306	406		
Environ trois secondes		100		

Il ne faut pas prendre les chiffres contenus dans la colonne « électrodes » comme constituant une véritable mesure de la résistance. Ils sont obtenus par soustraction de deux chiffres d'un ordre de grandeur de 10.000 ohms, sur lesquels on peut très bien supposer une erreur de 2 à 3 %. Il n'est donc pas étonnant que ces nombres présentent entre eux des écarts assez grands et que, même dans un cas, le calcul conduise à un nombre négatif. La seule chose à retenir, c'est la petitesse des différences observées vis-à-vis de celles trouvées dans le cas du corps humain, et nous pensons que cela suffit à établir que les électrodes n'entrent que pour une part tout à fait négligeable dans le phénomène que nous étudions, qui doit presque exclusivement être rapporté aux modifications produites par le courant dans le corps humain.

III. — CALCUL D'UNE FORCE CONTRE-ELECTROMOTRICE DE POLARISATION CAPABLE D'EXPLIQUER LES VARIATIONS OBSERVEES DANS LA CONDUCTIBILITE DU CORPS HUMAIN.

Lorsqu'on regarde une courbe des intensités d'un courant parcourant, à voltage constant, le corps humain (fig. 4 C), on est frappé par la ressemblance qu'elle offre, tout au moins dans sa première partie, jusqu'au minimum, avec une courbe établie de la même manière ou par une méthode oscillographique pour un circuit contenant un voltamètre à eau aci-

dulée (1). Or, nous savons que la décroissance du courant est due alors à l'apparition d'une force contre-électromotrice qui vient se retrancher du voltage de la source.

En est-il de même avec le corps humain ? Cette augmentation de résistance apparente observée dans tous les cas est-elle due, elle aussi, à une force contre-électromotrice engendrée par le passage du courant ?

La question méritait d'être envisagée ; aussi nous sommes-nous efforcé de déterminer les valeurs que devrait avoir à chaque instant une force contre-électromotrice capable de rendre compte du phénomène observé.

Le difficile était de connaître la grandeur de la résistance du circuit avant l'intervention des phénomènes de polarisation. Il ne fallait pas, en effet, songer à s'adresser à la méthode de Kolhransch qui, dans le cas du corps humain, comme l'a montré Weiss (1), est inutilisable. A défaut de donnée plus précise, nous avons donc pris comme résistance ohmique du circuit ce que nous avons appelé la résistance initiale du corps humain, plus les résistances additionnelles. Dès lors, pour calculer la force contre-électromotrice supposée E' , il suffit de remplacer dans l'équation fondamentale E par $E - E'$, d'où :

$$(3) \ E' = E - I R_0 - L \frac{dI}{dt}$$

Le tableau VII représente les valeurs de E' pour la même expérience qui a déjà fourni le tableau V.

TABLEAU VII

Force contre-électromotrice en volts.

Durées en 10-3 secondes	Différence de potentiel	
	20 v.	40 v.
0,1	4,7	4,9
0,26	13,9	15
0,52	17,6	13,8
0,78	17,7	10,6
1,04	17,6	9,7
1,56	17,3	8,4
2,08	17,2	7,1
Environ 3 secondes	9,5	

(1) R. BLONDOT : Thèse de Faculté des Sciences de Paris, 1881 ; et E. ROTHE : Thèse de la Faculté des Sciences de Paris, 1904.

(1) G. WEISS : *Archives d'Electricité médicale*, 1893.

Le calcul n'a pu être fait pour le voltage de 80 volts, parce que ce que nous avons appelé la résistance initiale est plus grand que les résistances calculées pour les différentes durées considérées, ce qui conduirait à des valeurs négatives pour la force contre-électromotrice de polarisation.

Si l'on traduit les résultats de ce tableau par des courbes (fig. 6), on peut faire les remarques suivantes. Les forces con-

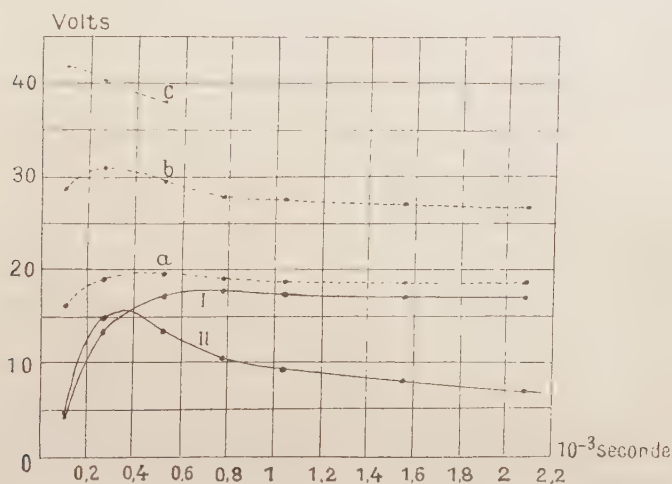


FIGURE 6.

Courbes des forces contre-électromotrices en fonction du temps.

I.	Voltage de 20 volts.	Résistance initiale de 4790 ohms.		
II.	— 40 —	— — —	4660	—
a,	— 20 —	— — —	700	—
b,	— 40 —	— — —	—	—
c,	— 80 —	— — —	—	—

tre-électromotrices auxquelles on est conduit, sont notablement plus grandes que celles que l'on rencontre dans les cas de polarisation d'électrodes métalliques et même que celles trouvées par les auteurs qui, comme Weiss, Chanoz et Gilde-meister, se sont, avant nous, occupés de cette question.

Pour chaque voltage, on constate que la force électromotrice met un certain temps pour apparaître, passe par un maximum, puis décroît ensuite plus lentement.

Si l'on compare ensuite les deux courbes entre elles, on remarque que la force électromotrice maxima apparaît plus

tôt quand le voltage s'élève, et décroît plus rapidement dans ce cas. Ces caractères ont été retrouvés dans un très grand nombre d'expériences ; on peut les considérer comme généraux.

Si maintenant l'on envisage les forces électromotrices maxima atteintes, on s'aperçoit qu'elles sont plus élevées dans le cas où le voltage et l'intensité sont les plus faibles. Ce résultat ne laisse pas que d'être inattendu ; il doit être attribué à la manière défectueuse dont nous avons évalué la résistance initiale. Nous nous rendrons mieux compte de cette influence dans le chapitre III, spécialement consacré à cette question importante de la résistance vraie du corps humain, indépendamment des phénomènes de polarisation.

Nous réservons également pour une étude ultérieure les raisons que l'on peut donner de cette évolution dans le temps de la force contre-électromotrice de polarisation dans les tissus vivants.

Si nous jetons un coup d'œil d'ensemble sur les données acquises au cours de cette première étude, nous pouvons les résumer ainsi. Il existe des variations considérables de la résistance apparente du corps humain dès la fermeture d'un courant émis à voltage constant. Ces variations sont vraisemblablement en rapport avec l'existence d'une force contre-électromotrice de polarisation, qui atteindrait une valeur dépassant, dans certains cas, les quatre cinquièmes de celle du voltage de la source.

De telles modifications dans la conductibilité présentent une grande importance tant au point de vue théorique, en ce qui concerne le mécanisme du passage de l'électricité dans les tissus vivants, que pour la mesure de l'excitabilité électrique des nerfs et des muscles, et méritent d'être étudiées de plus près.

CHAPITRE II

RECHERCHES SUR LA POLARISATION ÉLECTRIQUE

I. — TECHNIQUE

Les résultats acquis à l'aide de la méthode balistique précédemment exposée ne constituent qu'une réponse encore bien incomplète aux questions soulevées par le problème de la conductibilité des tissus vivants. En effet, si nous avons pu calculer quelle force contre-électromotrice serait capable de rendre compte des variations observées dans la résistance apparente, rien ne permettait d'affirmer l'existence d'une véritable polarisation ou, tout au moins, son influence prépondérante. Il pourrait fort bien se superposer à un phénomène de polarisation, réel, mais secondaire, une modification importante de la résistance vraie du corps humain.

Cette intervention simultanée de deux phénomènes semble même, *a priori*, l'explication la plus simple de la baisse de la résistance apparente avec la durée de passage du courant ; car une diminution de la force contre-électromotrice dans de telles conditions ne s'observe pas ordinairement au cours de la polarisation des électrodes métalliques.

Naturellement, si une telle association se trouvait réalisée, le mode de calcul employé pour la mesure de la force contre-électro-motrice serait en défaut, et le partage entre l'une et l'autre des deux actions impossible.

D'autre part, les valeurs des tensions de polarisation auxquelles nous avons été conduit sont tellement élevées que des recherches confirmatives s'imposent pour les faire adopter. Aussi, nous sommes-nous proposé de reprendre cette question avec une technique plus rigoureuse. Deux méthodes s'offraient à nous. Ou bien mesurer la résistance vraie au courant alternatif et la résistance apparente au courant continu,

comme l'avait fait Hermann, puis Gildemeister, ou bien déterminer la différence de potentiel qui existe entre les électrodes aussitôt après le passage du courant, suivant le principe appliqué par Hermann, Weiss et Chanoz.

La première méthode, plus simple en apparence, est sujette à une grave objection : on n'est jamais sûr pour quelle fréquence le phénomène de polarisation est supprimé. Nous avons vu que, suivant certains auteurs (de Metz, Philippson), la résistance des tissus continuerait à baisser jusqu'à de très hautes fréquences. De plus, il est douteux que l'artifice qui consiste à mettre une bobine de self en série avec le corps humain, pour améliorer le minimum d'intensité dans la diagonale du pont de Kohlrausch, conduise à une évaluation correcte de la résistance des tissus.

La mesure de la résistance vraie de l'organisme reste un des problèmes les plus ardues de la physique biologique qui, au moment où nous avons entrepris ces recherches, n'avait pas reçu de solution vraiment satisfaisante.

La deuxième méthode offre, par contre, une difficulté de technique. On sait que la force contre-électromotrice de polarisation se détruit très rapidement après le passage du courant. Il faut donc la « saisir », pour ainsi dire, juste au moment où le circuit est ouvert. C'est pour ne pas avoir suffisamment tenu compte de cette particularité que les expérimentateurs n'ont, jusqu'à présent, obtenu que des valeurs beaucoup trop faibles pour la force contre-électromotrice. Ils ne mesuraient qu'un résidu de polarisation. On peut invoquer une autre cause d'erreur, à la vérité plutôt théorique. L'ouverture du courant pourrait donner naissance à des forces contre-électromotrices par excitation des tissus. Cette hypothèse qui présenterait quelque vraisemblance, si nous avions affaire à des tensions faibles de l'ordre du volt, n'est pas, croyons-nous, à considérer, vu la grandeur des forces électromotrices de polarisation, trop importantes pour pouvoir être assimilées à un courant d'action.

En somme, cette dernière méthode nous donne une valeur de la polarisation certainement toujours approchée par défaut. Mais elle a l'avantage de ne laisser subsister aucun doute sur la nature, sinon sur l'origine, du phénomène étudié. Aussi est-ce à elle que nous nous sommes adressé, et voici la technique que nous avons utilisée.

Pour évaluer la différence de potentiel qui existe après l'ouverture du courant, nous avons employé la méthode

dite d'opposition, qui consiste à relier les électrodes aux pôles de même nom d'une source à potentiel variable, réglée de telle sorte qu'aucun courant ne passe dans le circuit ainsi constitué. On en conclut que le voltage de la source est alors exactement le même que celui que l'on se propose de connaître.

Montage des expériences. — Dans un premier circuit (fig. 7),

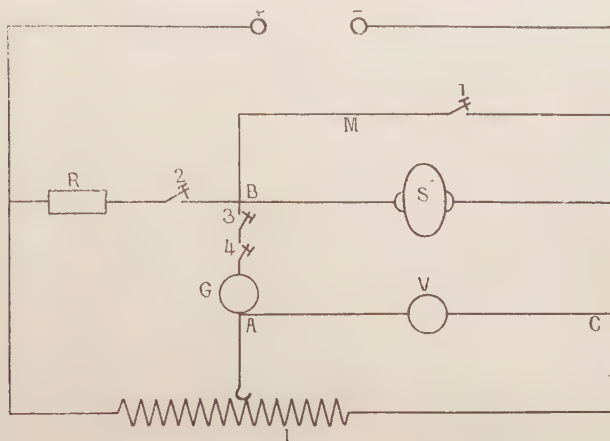


FIGURE 7.

S, sujet. — *R*, résistance. — *M*, shunt. — *I*, réducteur de potentiel. — *V*, voltmètre. — *G*, galvanomètre. — 1-2-4, clefs s'ouvrant, et 3, clef se fermant par le passage du pendule.

se trouve le sujet *S* et une boîte de résistance *R*. En dérivation sur le sujet, on place un shunt *M* de résistance négligeable, pouvant être supprimé par l'interrupteur 1. Au moyen d'une autre clef : 2, on peut couper le circuit général.

Un deuxième circuit, constitué par un distributeur de potentiel *I*, dont le rôle est d'établir une force électromotrice variable entre *C* et *A*, est monté parallèlement au premier. Entre *B* et *A* sont intercalés un galvanomètre sensible *G*, destiné à reconnaître si ces points sont ou non au même potentiel, et deux clefs de contact 3 et 4.

Ajoutons qu'un voltmètre *V* indique, à chaque instant, la différence de potentiel que l'on oppose à la force contre-électromotrice de polarisation.

Si l'on manœuvre successivement les clefs 1, 2, 3 et 4, de telle sorte que les clefs 1, 2 et 4 s'ouvrent, tandis que la

clef 3 se ferme, on voit que le courant passera dans le corps humain entre l'ouverture des clefs 1 et 2. Lorsque ensuite la clef 3 est fermée, la communication s'établit entre les électrodes et la force électromotrice d'opposition, jusqu'au moment de la rupture du contact 4.

La difficulté consistait à faire jouer les quatre clefs à des intervalles très petits et mesurables. Nous avons utilisé dans ce but deux interrupteurs automatiques que nous allons décrire.

1° *Pendule interrupteur*. — Il est constitué, essentiellement, par une barre de fer quadrangulaire de 28 millimètres de côté et de 2 mètres de long, pouvant osciller, avec le moins de frottement possible, autour d'un axe horizontal. Pour augmenter l'inertie du système, la barre porte, vers son milieu, une masse de plomb de 4 kilogs environ. Le pendule est primitivement écarté de sa position d'équilibre, de telle sorte que son extrémité inférieure est soulevée de 80 centimètres environ et repose sur un appui qui se dérobera au moment voulu, sous l'action d'un déclenchement électromagnétique libérant le pendule toujours de la même manière, sans lui communiquer d'accélération au début de son mouvement.

Dans sa course, le pendule passe devant quatre règles d'acier, horizontales, graduées en millimètres et fixées solidement au mur les unes au-dessous des autres.

Le long de ces règles coulisent les clefs qui sont de deux sortes, suivant qu'elles doivent ouvrir ou fermer un circuit.

Description des clefs. — Les clefs de rupture, les plus simples, se composent d'un levier qui, au moyen d'un ressort, peut, soit appuyer contre une butée pour fermer le circuit, soit se rabattre dans une position perpendiculaire. On évite ainsi le rebondissement qui ne manquerait pas de se produire après le choc assez violent du pendule. La base de cette clef porte un vernier qui permet d'apprécier sa position le long de la règle, au $1/10^e$ de millimètre.

S'il est facile d'obtenir, au moment voulu, la rupture franche d'un circuit, il est, au contraire, extrêmement difficile d'en réaliser la fermeture à un instant déterminé, à cause du rebondissement des pièces métalliques animées d'un mouvement rapide.

Nous avons fait construire une clef produisant la fermeture du circuit de la manière suivante (fig 8) :

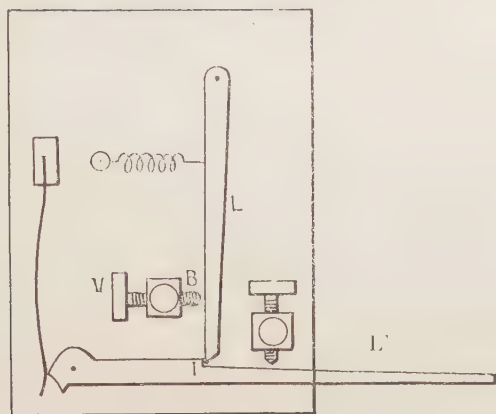


FIGURE 8.

Schéma de la clef de fermeture manœuvrée par le passage du pendule.

Un premier levier L' libre, sous l'action du choc, un deuxième levier L qu'il maintenait primitivement, au moyen d'un épaulement I , à une très petite distance d'une butée B réglable grâce à une vis micrométrique V .

Le contact entre L et B ferme le circuit électrique.

Si le ressort de rappel de L est suffisamment fort, si l'on règle la distance entre L et B à $1/10^e$ de millimètre, ou même moins, on évite les phénomènes de rebondissement, et l'on peut obtenir une fermeture de courant se produisant toujours au même moment par rapport au choc du levier L' par le pendule.

Lorsque l'on a besoin, comme ce fut le cas le plus fréquent dans nos expériences, d'une fermeture de très courte durée, on peut se contenter de faire fermer le circuit par deux pièces métalliques isolées, montées sur le même levier et maintenues faiblement écartées par une lame élastique qui se déforme sous l'action du pendule. Les deux pièces, après un court contact, se séparent par rebondissement, mais la durée de passage du courant est suffisante pour le but qu'on se propose. Il est d'ailleurs prudent, en vue de la régularité des mesures, de ne pas compter sur le rebondissement comme mode de rupture du courant, et de confier ce soin à une autre clef.

Réglage des clefs. — Il est naturellement de toute nécessité de déterminer avec précision les positions des clefs pour lesquelles la fermeture et la rupture se produisent simultanément. Le mieux, pour cela, est d'employer des procédés électriques. Proposons-nous, par exemple, une des clefs de rupture étant sur la division zéro de la règle, de chercher quelle doit être la position de la clef de fermeture pour que toutes deux fonctionnent simultanément.

Il suffit d'intercaler ces clefs, avec un galvanomètre sensible, dans un circuit pouvant être parcouru par un courant relativement fort. Tant que le courant, décelable à l'aide du galvanomètre, passera dans le circuit, c'est que la clef de fermeture jouera avant celle de rupture. On reculera alors celle-ci jusqu'au moment où le courant cessera de passer et la position-limite ainsi obtenue sera la position dite de zéro. S'il s'agit de régler deux clefs de rupture l'une par rapport à l'autre, on mettra une des clefs 1 dans le circuit général, tandis que la clef 2 rompra un shunt de résistance négligeable placé en dérivation sur le galvanomètre.

Tant que la clef 2 s'ouvrira avant la clef 1, le courant passera dans le galvanomètre et la position-limite, pour laquelle il diminuera brusquement d'intensité (car, même pendant la fermeture du shunt, il passe toujours un courant très faible dans la branche du galvanomètre), donnera la position du zéro.

L'inertie considérable du pendule nous a permis de construire les clefs d'une manière suffisamment robuste pour qu'elles résistent au choc sans déformation de leur part et sans modifier sensiblement la vitesse de la barre oscillante.

Néanmoins, nous avons eu soin de procéder à un nouveau réglage des quatre clefs au début de chaque nouvelle série d'expériences.

Etalonnage de l'appareil. — C'est par la méthode graphique que nous avons déterminé le temps mis par l'extrémité du pendule pour parcourir une distance donnée. Les positions de zéro de deux clefs de rupture ayant été déterminées, on avance une des clefs de 10 centimètres par rapport à l'autre et on intercale chacune de ces clefs dans un circuit comprenant deux accumulateurs et un signal de Desprez. Les deux signaux marquent leurs traces sur un cylindre tournant à grande vitesse, en même temps qu'un diapason donnant 500 V. D. par seconde. En prenant les précautions d'usage en méthode graphique, on arrive à connaître le temps mis

par l'extrémité du pendule pour franchir 10 centimètres. Pour cette longueur comptée sur la règle de la clef n° 3, nous avons trouvé $10/500^{\text{es}}$ de seconde, ce qui correspond à une vitesse de 0,002 par centimètre.

Si l'on fait la même expérience pour les autres clefs, on ne trouvera pas exactement le même chiffre, car les différents points du pendule décrivent des arcs de cercle inégaux dans le même temps. Cependant, les règles étant très rapprochées les unes des autres par rapport à la longueur du pendule, l'erreur commise sur le temps, en considérant un même déplacement des clefs les plus éloignées, n'est que de 5 % environ et peut donc être négligée. Il serait d'ailleurs des plus faciles d'en tenir compte.

Le montage étant réalisé suivant le schéma de la figure 7 et les clefs étant réglées à leur position de zéro, on commence par établir entre celles-ci les écarts qui détermineront les différentes phases de l'expérience. C'est ainsi que l'écart entre les interrupteurs 1 et 2 conditionnera la durée de passage du courant polarisant, l'écart entre 2 et 3 l'intervalle qui s'écoulera entre la fin du courant et le début de l'opposition des deux forces électromotrices. Il y a, le plus souvent, avantage à réduire ce temps au minimum pour diminuer la cause d'erreur due à la baisse rapide de la polarisation. Ces deux clefs doivent donc être réglées avec le plus grand soin et, dans ces conditions, nous estimons que ce « temps perdu » écoulé entre l'ouverture d'un des circuits et la fermeture de l'autre est de l'ordre d'un dix-millième de seconde. Enfin l'écart entre les clefs 3 et 4 règle la durée de l'opposition. Il y aura aussi intérêt à ce que cette durée soit aussi faible que possible, puisque, à cause de la diminution de la force électromotrice de polarisation, ce qu'on mesure n'est, en somme, qu'une valeur moyenne. Mais là on se trouve limité par la sensibilité du galvanomètre, qui ne présente une déviation nette que s'il est traversé par une certaine quantité minima d'électricité. Si l'on se contente, comme nous l'avons fait, d'apprécier la force contre-électromotrice à deux ou trois dixièmes de volt près, on peut réduire la durée d'opposition jusqu'à 0,0002 seconde.

Voici comment l'on procède à une expérience. On commence par régler le voltage de la source *S* et les résistances aux valeurs voulues, en laissant le voltage d'opposition nul ; puis, les clefs étant dans les positions convenables, on libère le pendule en observant de quel côté dévie le galvanomètre.

On augmente alors progressivement la force électromotrice

d'opposition à l'aide du réducteur de potentiel, jusqu'à ce que le galvanomètre reste au zéro quand on manœuvre le pendule. A ce moment, l'indication du voltmètre représente sensiblement la valeur de la force contre-électromotrice de polarisation. Pour ne pas trop multiplier le nombre des mesures, nous nous sommes contenté de faire croître la force électromotrice d'opposition par demi-volt. En tenant compte de l'amplitude des plus petites déviations inverses du galvanomètre, on peut, par interpolation, évaluer la polarisation à quelques dixièmes de volt près, ce qui est amplement suffisant.

2° *Interrupteur à chute.* — Ce n'est qu'une modification de l'égersimètre, ce qui nous permettra de le décrire rapidement. La masse, en tombant, heurte toujours deux clefs, mais celles-ci ont été adaptées à la mesure de la force contre-électromotrice. La première est restée, en général, la même, c'est-à-dire que nous nous sommes servi, pour avoir un début franc du courant à travers le sujet, de la rupture d'une dérivation.

Cependant, dans certaines expériences où nous ne voulions pas mettre de résistances supplémentaires en série avec le sujet, nous avons dû utiliser une clef de fermeture spéciale, construite sur le modèle de celle qui est représentée sur la figure 8.

Malgré le soin extrême apporté dans sa construction dans les ateliers de la maison Gaiffe, Gallot et Pilon, on ne peut, dans ces conditions, obtenir une fermeture de courant à un instant exactement déterminé, une certaine incertitude subsiste sur l'intervalle écoulé entre le début du courant et celui de la mesure. Cela n'a pas, d'ailleurs, une très grande importance, notamment quand on ne se propose que de connaître la valeur maximum atteinte par la polarisation, à cause de l'étalement de la courbe de la force électromotrice au niveau de ce maximum.

Quant à la deuxième clef, qui a pour but de rompre le courant polarisant et de pratiquer l'opposition pendant un temps très court, elle a été l'objet d'essais nombreux avant de trouver un dispositif nous donnant satisfaction.

Voici le système qui nous a paru le meilleur (fig. 9).

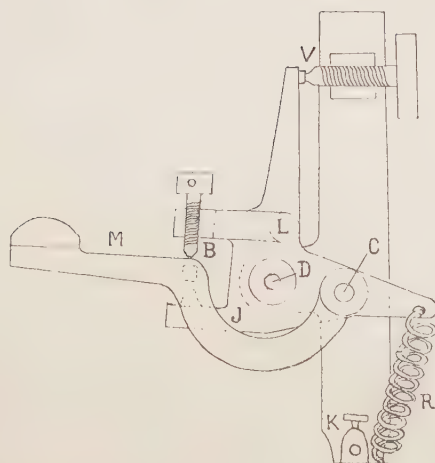


FIGURE 9.
Commutateur de l'égersimètre.

Il se compose essentiellement d'un levier *M*, tournant autour d'un axe *C*, et pouvant se déplacer entre deux butées, une supérieure *B* communiquant avec une borne *L*, et une autre inférieure en relation, par une armature métallique *J*, avec la vis *V* qui formait un des contacts de la clef de l'égersimètre. Cette armature tourne autour d'un second axe *D*, et est maintenue contre la vis *V*, à l'aide d'un ressort de rappel *R*. Ce dernier sert également à amener le courant à partir d'une borne fixe *K*. La position des axes *C* et *D* est telle que l'action du ressort *R* a pour effet, en même temps, d'appuyer l'armature *J* contre la vis *V* et le levier *M* contre la butée supérieure. Quand la masse de l'appareil vient à heurter l'extrémité du levier *M*, celui-ci quitte la butée supérieure pour venir appuyer sur l'inférieure. Lorsque cet appui atteint une valeur suffisante, l'armature *J* tourne entièrement autour de l'axe *D* et le contact est rompu avec la vis *V*. Si les pièces composant ce petit appareil étaient absolument indéformables, le contact se romprait en *V*, en même temps que le levier viendrait heurter la butée inférieure. En fait, quoique les leviers soient taillés dans des lames d'acier extrêmement rigides, la durée pendant laquelle le levier *M* reste en contact électrique avec la vis *V*, tout en étant très courte, peut être

utilisée pour réaliser l'opposition, qui, pour la précision des mesures doit être la plus brève possible. Une vis micrométrique règle la position de la butée supérieure et permet de ne donner qu'une course de quelques centièmes de millimètre au levier entre les deux butées. Il convient d'ajouter que le levier M , la butée B et l'armature J sont soigneusement isolés électriquement les uns des autres à l'aide de plusieurs épaisseurs de lames de mica. Ce dispositif a été réalisé dans les ateliers Gaiffe, Gallot et Pilon avec toutes les ressources de la mécanique de précision, et le fonctionnement en est d'une grande régularité.

Pour s'en servir à la mesure des forces contre-électromotrices de polarisation, on réunit le levier M au point B du circuit représenté sur la figure 7. La butée supérieure est en relation avec la résistance R de la même figure, et la vis V en communication électrique avec le galvanomètre. Quand on veut mesurer la valeur de la force contre-électromotrice aux différents moments du passage du courant, on soulève progressivement le premier levier de l'égersimètre et on lit la durée de passage du courant sur la graduation de l'appareil. Ce dispositif pourrait également être utilisé pour l'étude de la décroissance de la polarisation après l'interruption du courant polarisant, mais, jusqu'à présent, nous ne l'avons pas employé pour cet usage.

Il nous a paru utile d'essayer de mesurer, au moins approximativement, les durées qui s'écoulent entre la rupture du courant polarisant et le début de l'opposition d'une part, entre le début et la fin de la période d'opposition d'autre part. Nous nous sommes adressé pour cette évaluation à la méthode électrique que nous avons exposée plus haut à propos du pendule.

Dans une première expérience, nous avons mesuré la quantité d'électricité qui passe entre la rupture d'une dérivation constituée par la butée supérieure et le levier M , et la rupture du circuit général au niveau de la vis V . Cette quantité d'électricité correspond au temps perdu et à la durée d'opposition. Dans une deuxième expérience, nous avons mesuré, par la méthode balistique, la quantité d'électricité qui passe dans le galvanomètre pendant l'opposition.

Il est facile ensuite de rechercher à quel écartement des clefs de l'appareil, fonctionnant dans les conditions normales, correspond ces quantités d'électricité, et comme l'appareil à chute est étalonné, on en déduit les durées que l'on désire connaître.

Voici les résultats obtenus :

$$\begin{aligned}\text{Temps perdu} + \text{durée d'opposition} &= 4 \cdot 10^{-5} \text{ environ} \\ \text{durée d'opposition} &= 3 \cdot 10^{-5} \text{ environ}\end{aligned}$$

Par différence on obtient :

$$\text{Temps perdu} : 1 \cdot 10^{-5}$$

Naturellement, pour des temps aussi courts, il ne saurait s'agir de mesures précises. Nous verrons cependant ultérieurement qu'il est très utile, pour certaines questions intéressant les vitesses de la polarisation, de savoir à peu près le temps dévolu aux différentes phases de la méthode.

Nous avons soumis notre dispositif à un contrôle d'un autre ordre qui se rapproche davantage des conditions dans lesquelles se font les mesures de polarisation et qui donne d'une manière plus directe une notion de la précision que comporte de telles mesures. Pour cela, nous avons remplacé le corps humain par une résistance R' , shuntée par un condensateur étalon de 1 microfarad sectionné en dixièmes de microfarad. Nous donnons à la résistance R et à la résistance R' la même valeur de 500 ohms. Dans de telles conditions, en régime permanent, le point B (fig. 10, II) situé entre les deux boîtes de résistance doit avoir un voltage qui est égal à la moitié de la différence de potentiel qui existe entre les extrémités du réducteur de potentiel.

Lorsque l'on coupe le courant au moyen de la clef 2, la quantité d'électricité retenue par les armatures du condensateur se décharge à travers la résistance de 500 ohms. On sait que la vitesse avec laquelle s'opère cette décharge dépend du facteur $1/R'C$. Nous pouvons donc la faire varier en modifiant le produit $R'C$. Pour la facilité de l'expérience, nous avons laissé R' constant et avons pris pour C un nombre variable de dixièmes de microfarad. Il nous a paru intéressant de comparer les résultats de mesures du potentiel initial du point B , effectuées par la méthode précédemment décrite aux valeurs théoriques. Alors que la différence de potentiel initiale entre les deux armatures du condensateur est toujours, d'après le calcul, égale à la moitié du voltage de la source, l'expérience montre que sa mesure, exécutée par la méthode d'opposition telle que nous la pratiquions, donne un chiffre toujours inférieur.

TABLEAU VIII

$R = R' = 500$ ohms.

Voltage de la source : 20 v. (interrupteur à chute).

Capacité en microfarad	Voltage mesuré, en volts	Voltage calculé, en volts
—	—	—
1	9,5	10
0,5	8,8	10
0,3	7,8	10
0,2	6,9	10
0,1	4,7	10

La dépolarisation ne s'effectue pas, ainsi que nous aurons l'occasion de le montrer, suivant une courbe exponentielle, mais on pourra toujours assimiler le début de cette dépolarisation à la décharge d'un condensateur et, suivant la rapidité avec laquelle elle se produira, la mesure de la force électromotrice sera plus ou moins bonne. Nous verrons, quand nous étudierons la dépolarisation des tissus, que cette vitesse initiale ne peut être connue qu'avec une approximation assez faible. Cependant, il résulte de nos expériences et de celles de David, que le facteur $1/RC$, dans le cas de la courbe de dépolarisation, doit rester inférieur à 2000. Nous sommes en droit d'en conclure que la force contre-électromotrice de polarisation peut être connue avec une précision au moins de l'ordre du demi-volt, ce qui correspond à une erreur relative d'un vingtième. Il serait illusoire, dans les conditions où l'on opère, de vouloir compter sur une approximation meilleure.

UTILISATION DE LA LAMPE A TROIS ELECTRODES. — Les propriétés si intéressantes de la lampe à trois électrodes, qui en font un relai dépourvu de toute inertie, nous ont paru pouvoir être mises à profit pour la mesure de la force contre-électromotrice de polarisation. Nous savons, en effet, que, lorsqu'on relie la grille au filament, cette lampe jouit des propriétés d'une valve. Le courant peut alors passer quand la plaque se trouve à un potentiel supérieur au filament et ne passe pas en sens inverse. Supposons maintenant que nous effectuions le montage de telle sorte que le commutateur permettant de mettre le sujet en opposition avec la force contre-électromotrice du réducteur de potentiel soit relié à l'électrode positive du sujet, dans ces conditions, dès que le courant aura cessé d'agir, le voltage de cette électrode décroîtra rapidement, et nous avons vu que c'est la raison pour

laquelle l'opposition ne doit être réalisée que pendant un temps très court.

Intercalons alors la lampe dans la branche du galvanomètre, de telle sorte que la plaque soit reliée à l'électrode positive du sujet et le filament au réducteur de potentiel. (Fig. 10.)

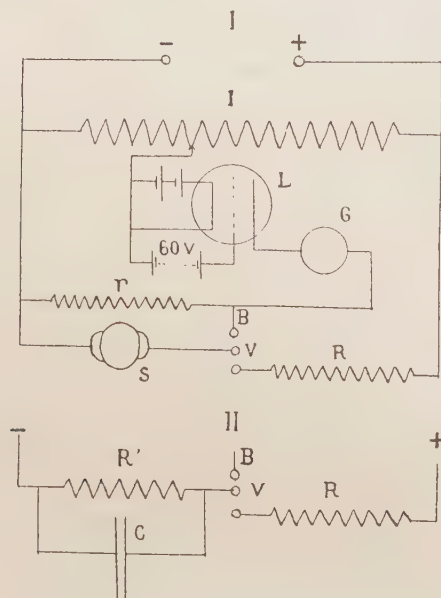


FIGURE 10.

I, réducteur de potentiel. — *L*, lampe à trois électrodes. — *G*, galvanomètre. — *S*, sujet. — *R*, *R'*, résistances. — *C*, condensateur. — *V*, commutateur de l'égersimètre.

Le courant ne passera dans la lampe que si le voltage donné par le réducteur de potentiel est inférieur au voltage maximum de l'électrode positive. On comprend que, si l'on déplace le curseur du réducteur de potentiel jusqu'à ce qu'en manœuvrant l'appareil à chute on n'observe plus aucune déviation du galvanomètre, on pourra avoir ainsi une estimation du voltage maximum qui existe entre les électrodes, donc de la force contre-électromotrice de polarisation.

Cette méthode aurait théoriquement l'avantage de supprimer la dernière interruption automatique du courant dans la branche du sujet. En pratique, pour qu'elle donne le maximum de précision dont elle est susceptible, il faut prendre quelques précautions. Tout d'abord, la lampe à trois électrodes, présentant une résistance considérable pour les petites différences de potentiel, il convient, afin de disposer d'une sensibilité suffisante, d'augmenter autant que possible le courant qui naîtra pour de faibles différences de potentiel. On y parvient en portant la grille à un potentiel notablement supérieur à celui du filament. Nous avons représenté, d'après G. Gutton (fig. 11), les caractéristiques que l'on obtient si, mainte-

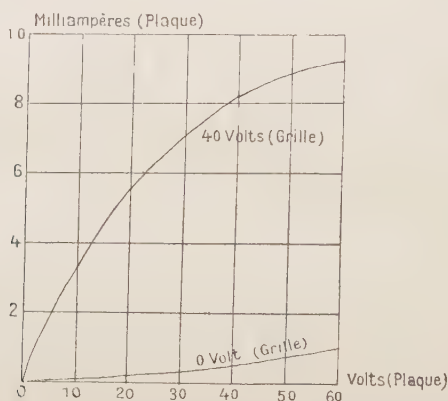


FIGURE 11.

*Courant de plaque d'une lampe à trois électrodes
en fonction du voltage de la plaque
suivant le voltage de la grille. (D'après Gutton.)*

nant à 0 ou à 40 volts la différence de potentiel entre la grille et le filament, on étudie comment varie l'intensité du courant de plaque, suivant la différence de potentiel entre la plaque et le filament. On voit que le courant, pour de petites différences de potentiel, est incomparablement plus fort lorsque la grille est à un potentiel supérieur de 40 volts au filament. Pour accentuer cet effet, nous avons porté notre grille à un potentiel de 60 volts:

Il faut, en outre, tenir compte de ce fait que la lampe triode n'est pas une valve parfaite. Il y a toujours, même pour des potentiels négatifs de la plaque, quelques électrons qui atteignent celle-ci, ce qui fait que la position du spot du galvanomètre dépend du potentiel de la plaque. Aussi, pour ne pas être gêné par ces déviations parasites du spot, faut-il ne réaliser l'opposition que pendant un temps relativement court, ce qui est facile avec l'égersimètre. Une résistance de 100.000 ohms, r , placée entre la plaque et le pôle *moins* de la source, ramène le potentiel de la plaque à la valeur initiale dès qu'on a cessé l'opposition, et, dans ces conditions, le seul mouvement du galvanomètre est dû au passage du courant, au moment où les deux forces électromotrices s'opposent.

Nous avons, avec cette technique, procédé aux mêmes opérations de contrôle qu'avec la précédente. En voici le résultat :

TABLEAU IX

Mêmes conditions expérimentales que pour le tableau VIII.

Capacité en microfarad	Voltage en volts
1	9,3
0,5	8,5
0,3	7,6
0,2	6,7

On voit que l'approximation est du même ordre qu'avec la technique précédente. Quand l'appareil est réglé au mieux, l'avantage semble même rester à la méthode qui réalise l'opposition par des moyens purement mécaniques, et cela se comprend, puisqu'on n'a pas besoin alors d'intercaler dans la branche du galvanomètre une résistance considérable, comme celle qui est constituée par la lampe triode. Toutefois, la présence de la lampe dans le circuit nous a paru être un élément de régularité dans les mesures, dû sans aucun doute à ce fait que les variations accidentelles dans la durée de l'opposition sont dans ce cas sans influence notable sur la quantité d'électricité qui traverse le galvanomètre, pour obtenir la déviation minima de ce dernier.

A la vérité, ce sont les circonstances qui nous ont contraint, depuis trois ans que nous poursuivons ces recherches, à modifier notre technique. Nous ne le regrettons pas, car ces essais successifs nous ont permis de perfectionner la méthode de mesure. Il n'est pas douteux que c'est notre interrupteur

à chute qui nous a donné les meilleurs résultats, qu'on l'emploie avec ou sans la lampe à trois électrodes. Dans ces deux derniers cas, la durée d'opposition est plus réduite qu'avec le pendule, et surtout le fonctionnement beaucoup plus régulier.

L'expérience nous a appris, en effet, que, pour réaliser des appareils automatiques manœuvrant des contacts électriques à des instants bien déterminés, il vaut mieux se servir d'un organe mobile, à faible vitesse, actionnant des leviers placés à des distances petites les unes des autres, mais rigoureusement mesurées, que d'utiliser des pièces lancées à grande vitesse, ce qui permet d'espacer davantage les clefs de contact. En effet, chaque fois que l'on a des chocs violents, on ne peut éviter à la longue, et même dans des délais parfois assez courts, la déformation des parties qui entrent en contact, ce qui est une cause d'imprécision dans les mesures.

Dans les protocoles des expériences qui suivent, nous aurons soin de mentionner quel appareil a été utilisé. Le lecteur saura que, lorsque c'est le pendule, il faut considérer les valeurs relatives des grandeurs mentionnées et que, dans le cas où l'on a utilisé l'appareil à chute, au contraire, la précision a été la meilleure que nous ayons pu actuellement réaliser, soit $1/20^{\circ}$ environ.

I. — VARIATIONS DE LA POLARISATION AVEC LA DUREE DU COURANT POLARISANT

La première constatation qui frappe, quand on effectue des mesures de la force contre-électromotrice pour des durées croissantes du courant polarisant, c'est que la polarisation commence d'abord par croître jusqu'à une valeur maxima, pour diminuer ensuite de plus en plus lentement au fur et à mesure que le courant passe.

Si l'on traduit ces résultats par une courbe (fig. 12), on se rend compte de l'évolution de la polarisation, qui correspond tout à fait à ce que nous avons trouvé à partir des courbes de conductibilité.

Cette modification de la polarisation nous a paru un fait absolument général, bien que, comme nous allons le voir plus loin, la grandeur du maximum et sa position dans le temps changent considérablement avec les conditions expérimentales.

TABLEAU X

Electrode indifférente médiane.

Electrode active de 3 cm² sur l'avant-bras gauche.

Voltage : 20,0 v. ; $R = 20.000$ ohms (interrupteur à chute).

Durée du courant polarisant en 10 ⁻³ seconde	Force contre-électromotrice en volt.
0,5	9
1	13
2,1	15,8
2,6	16,7
3,6	17
4,7	17
8,3	16,5
20,8	16
41,6	15,5
5000 environ	13

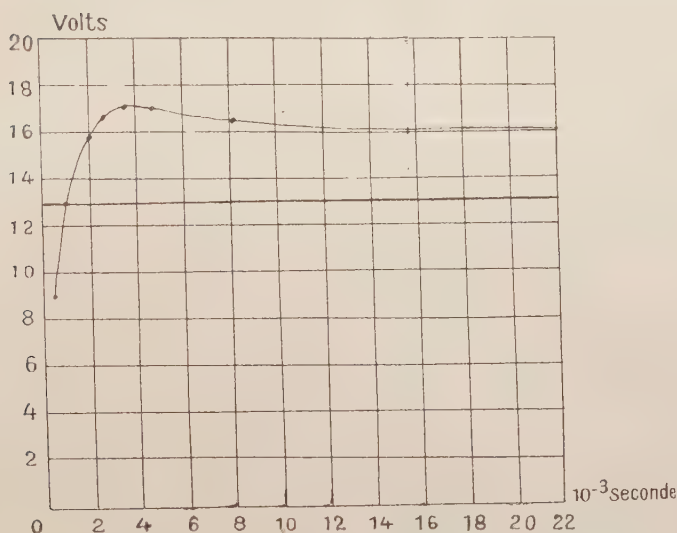


FIGURE 12.

Courbe de la force contre-électromotrice de polarisation en fonction du temps.

E. David [22] qui, après nous, a effectué des mesures de force contre-électromotrice de polarisation avec une technique semblable à la nôtre, est arrivé à des conclusions tout

à fait analogues, sur lesquelles nous aurons l'occasion de revenir.

II. — VARIATIONS AVEC L'INTENSITÉ DU COURANT POLARISANT

Contrairement à ce qui se passe pour la polarisation métallique, l'intensité intervient en modifiant grandement la force contre-électromotrice, et si l'on ne peut pas dire qu'elle est déterminée uniquement par l'intensité du courant polarisant, c'est elle, tout au moins, qui constitue le facteur prépondérant.

Pour étudier l'influence de l'intensité du courant, nous avons pris une source à voltage élevé, en intercalant de grandes résistances ohmiques, pour que la force contre-électromotrice agisse peu sur la forme du courant et que celui-ci reste ainsi à peu près constant.

TABLEAU XI

Electrodes de 60 cm² : une dorsale, l'autre sur l'avant-bras.
Voltage : 140 v. (pendule).

DURÉE DU COURANT POLARISANT en 10 ⁻³ seconde	FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE		
	90.000 ohms	26.000 ohms	12.000 ohms
0,4	1,5	4,5	5,5
1	3	9	13
2	4	12	13,5
4	5,5	12,5	13,5
8	7	12,5	12
12	9	11,5	
20	9		
36	9		

La représentation graphique de ces mesures (fig. 13) montre que, en même temps qu'une augmentation dans la valeur du maximum avec l'intensité, il y a déplacement de ce maximum vers l'origine. En outre, si l'on prolonge suffisamment l'expérience, on observe que la baisse de la polarisation est d'autant plus accentuée que le courant est plus intense.

Il est à remarquer que le rapport du maximum de la force électromotrice à l'intensité du courant prend successivement les valeurs 62, 24 et 21, 10², qui varient nettement en sens inverse de l'intensité. On ne peut donc pas parler de « cons-

tante de polarisation » au sens où l'entendait Hermann. Ce dernier auteur considérait d'ailleurs non le maximum de la polarisation, mais la valeur atteinte pour des durées de passage relativement fort longues. Il résulte de nos expériences que, dans ce cas aussi, le quotient de polarisation diminue quand l'intensité croît, mais d'une manière moins accentuée.

Signalons, en outre, ce fait, que, si l'on effectue le produit du temps au bout duquel est atteint le maximum, par l'intensité du courant, on obtient, dans la plupart des cas, un chiffre assez constant, ce qui semblerait indiquer que la quantité d'électricité joue un rôle important dans ce phénomène.

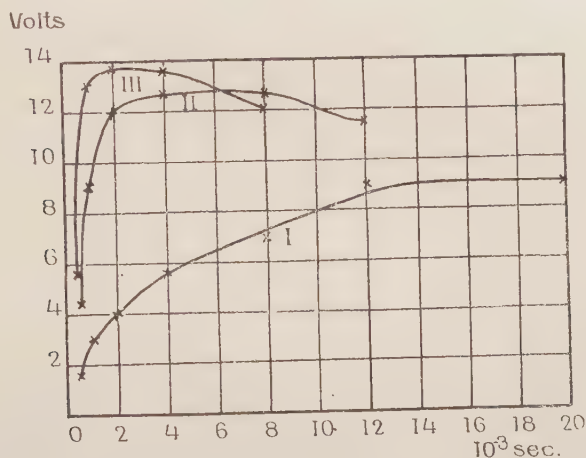


FIGURE 13.

I, II et III, courbes de la force contre-électromotrice en fonction du temps pour des intensités croissantes de courant polarisant.

III. — VARIATIONS AVEC LE VOLTAGE DE LA SOURCE

Si l'on fait croître le voltage sans changer la résistance du circuit, cela revient à augmenter l'intensité, et on voit le maximum de polarisation croître avec le voltage. Il est à noter que ce maximum croît moins vite que le voltage, ainsi que l'on devait s'y attendre d'après les résultats du paragraphe précédent. Si l'on fait la courbe des maxima de force électromotrice en fonction du voltage, on obtient une courbe concave vers l'axe des volts de la source et qui semble tendre vers une valeur asymptotique difficilement accessible avec des intensités supportables pour les sujets.

Nous verrons que cette polarisation maxima suivant le voltage varie avec les dimensions des électrodes.

TABLEAU XII

Sujet I. L. — Deux petites électrodes de 3 cm² sur les faces antérieures des deux avant-bras.

Résistance additionnelle : 30.000 ohms (interrupteur à chute).

Voltage de la source : E	Force contre-électromotrice maxima : e	Rapport $\frac{e}{E}$
—	—	—
10	8	0,8
20	14	0,7
30	20	0,66
40	23	0,57
50	24,5	0,49
60	26	0,43

Ce tableau montre nettement la diminution du rapport de la force contre-électromotrice maxima au voltage de la source quand ce dernier augmente.

En somme, la vitesse d'apparition de la force contre-électromotrice est déterminée par l'intensité au début du passage du courant. C'est-à-dire que, pour un voltage donné, elle sera d'autant plus grande qu'il y aura moins de résistances additionnelles. Le maximum de polarisation dépendra de la surface des électrodes (voir plus loin), du voltage de la source et des résistances additionnelles. Le rapport du maximum de force contre-électromotrice au voltage de la source est d'autant plus élevé que le voltage est plus faible et qu'il y a moins de résistances supplémentaires dans le circuit. C'est ainsi que, lorsque nous nous sommes servi de l'appareil à chute, nous avons obtenu des forces contre-électromotrices de 17 à 18 volts pour un voltage de la source de 20 volts. Dans ces expériences, il n'y avait naturellement aucune autre résistance que le corps humain dans le circuit, et nous avons dû nous servir de la clef précédemment décrite pour fermer le courant polarisant.

David, dans son étude sur les phénomènes électromoteurs secondaires présentés par la peau humaine, en se servant d'une technique analogue à la nôtre, sauf en ce qui concerne l'interrupteur automatique qui était constitué par le pendule de Helmholtz convenablement modifié, a même observé dans un cas une force contre-électromotrice de 9,5 volts pour un voltage de la source de 10 volts.

Quand à la décroissance de la force contre-électromotrice, elle s'effectuera avec une rapidité d'autant plus grande que l'intensité à partir du maximum est plus élevée. C'est-à-dire que ce sont les cas où le rapport entre la polarisation maxima et le voltage de la source est le plus grand qui présentent la baisse de la force électromotrice la plus lente.

Si maintenant l'on modifie simultanément la résistance additionnelle de telle manière que l'intensité initiale reste approximativement la même, on constate que les valeurs maxima de la polarisation ne sont pas considérablement modifiées.

TABLEAU XIII

Electrodes de 60 cm² : une sur la partie médiane du dos, l'autre sur la face externe du bras (pendule).

Durée du courant polarisant 10 ⁻³ seconde	20 volts 28.000 ohms	40 volts 56.000 ohms	140 volts 200.000 ohms
—	—	—	—
1	1	1	0,5
2	2,5	2,5	
4			3
8	5	5	4,5
16	5,5	5,5	5,5
20	5,5		
36	5,5		4

Bien que les intensités ne soient pas ici rigoureusement égales, on vérifie que le maximum garde sensiblement la même valeur et se produit à peu près au même moment. Naturellement, comme l'importance relative de la force contre-électromotrice est plus grande pour les bas voltages, l'intensité diminuera davantage dans ce cas, ce qui explique la baisse moins rapide de la polarisation que pour les voltages élevés, où l'intensité conserve à peu près sa valeur initiale.

IV. — VARIATIONS AVEC LA SURFACE DES ELECTRODES

Disons tout de suite que nos électrodes, constituées par des lames d'argent recouvertes électrolytiquement de chlorure d'argent et mises en contact avec la peau par l'intermédiaire de compresses imbibées d'une solution de chlorure de sodium, se sont montrées pratiquement impolarisables.

En mettant ces électrodes au contact et en les faisant traverser par des courants plus intenses que ceux employés

dans nos expériences sur le corps humain, nous n'avons jamais pu déceler une force contre-électromotrice supérieure à une fraction de volt.

Les électrodes n'agissent donc que comme porte d'entrée et de sortie du courant, et la seule propriété à considérer est leur surface. Mais, à ce point de vue, elles donnent des résultats intéressants qui apportent quelque lumière sur le mécanisme de la polarisation. La variation et la force contre-électromotrice avec la surface des électrodes est différente et même inverse suivant l'intensité du courant polarisant. Nous avons utilisé comme grandeurs d'électrodes les surfaces suivantes : 60 c/m², 3 c/m², et 0,5 c/m². Pour des courants relativement faibles de 1 à 5 mA, par exemple, la polarisation est plus grande pour les petites électrodes et le maximum plus précoce. Au contraire, quand l'intensité atteint une certaine valeur, mettons 8 mA, on obtient avec les petites électrodes des forces contre-électromotrices plus petites qu'avec les grandes. Cependant les maxima sont toujours plus rapprochés de l'origine avec les petites électrodes.

Pour s'en convaincre, il suffit de comparer les résultats du tableau XIV avec ceux du tableau XI qui ont été obtenus au cours de la même expérience.

TABLEAU XIV

Electrodes de 3 cm² : une dorsale, l'autre sur l'avant-bras.

Voltage : 140 v.

Durée d'opposition : 0,0002 seconde environ (pendule).

DURÉE DU COURANT POLARISANT en 10 ⁻³ seconde	FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE		
	90.000 ohms	26.000 ohms	12.000 ohms
0,4	7	12	11,5
1	12	9,5	11
2	12	9	8
4	11		

On voit également apparaître ici un fait que nous avons déjà signalé. Pour les petites électrodes, la force contre-électromotrice maxima n'est pas sensiblement augmentée quand on a accru l'intensité.

On serait tenté d'admettre qu'il existe une espèce de saturation au delà de laquelle une augmentation de la densité du courant serait sans action sur la polarisation. En réalité, ce n'est pas la densité du courant qui règle exclusivement la production de la force contre-électromotrice, comme on peut

s'en rendre compte par l'expérience suivante, où l'on a déterminé les polarisations obtenues avec des électrodes de surfaces très inégales, les intensités étant telles que les densités soient à peu près les mêmes dans les deux cas. (Voir tableau XV.)

TABLEAU XV

Voltage : 140 v.

Durée d'opposition : 0,0002 seconde environ (pendule).

DURÉE DU COURANT POLARISANT en 10^{-3} seconde	FORCE CONTRE-ÉLECTROMOTRICE	
	Electrodes de 3 c/m 200.000 ohms	Electrodes de 60 c/m ² 10.000 ohms
—	—	—
0,4	9	32
1	12	40
2	14	40
4	16	

On voit que la surface la plus grande donne, à densité égale, une force contre-électromotrice beaucoup plus élevée.

Ce fait pourrait s'expliquer par une tendance qu'aurait la polarisation à se détruire au moyen de circuits se fermant dans l'intérieur de l'organisme, à la périphérie de la zone traversée par le courant. Plus la surface d'entrée sera petite, plus l'importance de ces circuits dérivés par rapport à la surface elle-même sera grande, et moins la polarisation pourra atteindre une valeur élevée.

Nous avons réalisé un modèle hydraulique qui rend compte grossièrement de ce phénomène. Il était constitué simplement par deux tubes en toile métallique très fine, fermés à une de leurs extrémités par un bouchon. Sur la toile métallique était fixé un manchon de toile de lin destiné à diminuer la perméabilité du treillage métallique. Les diamètres de ces tubes étaient respectivement de 70 et de 30 m/m, leur hauteur commune de 30 c/m.

Lorsque l'on fait arriver dans chacun des tubes un courant d'eau constant, on voit le niveau monter progressivement tandis que l'eau s'échappe par les parties latérales. Comme la quantité que laisse passer la toile va en augmentant au fur et à mesure que le niveau s'élève, il arrive qu'au bout d'un certain temps le tube perd autant d'eau qu'il en gagne, c'est-à-dire que le niveau reste constant. Nous assimilons ce niveau au maximum de polarisation atteint par un courant donné, la déperdition latérale représentant les circuits qui se ferment dans les tissus.

Pour un même débit d'eau, nous constatons les niveaux suivants :

Petit tube : 153 millimètres

Grand tube : 88 —

C'est ce qui se passe avec de faibles courants polarisants pour lesquels les petites électrodes donnent une polarisation maxima plus forte que les grandes.

Faisons pénétrer maintenant dans les tubes des débits universellement proportionnels aux sections de ceux-ci. Pour cela, nous avons réglé le débit de telle sorte qu'un volume donné soit rempli en cinq secondes, pour le courant qui pénètre dans le grand tube et en vingt-sept secondes pour le courant qui pénètre dans le petit. On observe alors que les niveaux maxima atteints sont :

Pour le petit tube : 47 millimètres

Pour le grand tube : 80 —

On retrouve donc les résultats observés dans le cas où le courant polarisant pénètre à densité égale par des électrodes de surfaces inégales. Ce sont les plus grandes surfaces qui donnent la plus forte polarisation.

Sans vouloir établir un rapport étroit entre les deux ordres de phénomènes hydraulique et électrique, nous pensons qu'on peut ainsi illustrer certaines particularités de la polarisation des tissus.

Quand les électrodes seront de diamètres inégaux, comme c'est le cas dans la méthode d'électro-diagnostic dite « unipolaire », les forces contre-électromotrices doivent prédominer d'abord dans la région de la plus petite, où la densité est la plus grande, puis quand cette région aura présenté l'apparente saturation dont nous parlons plus haut, l'accroissement de la force contre-électromotrice se fera surtout près de la grande électrode.

Ce que l'on mesure alors, c'est la somme des forces électromotrices qui prennent naissance dans chacune des couches cellulaires et qui ne sont pas toutes, à cause de l'inégalité des densités, au même stade de leur évolution.

V. — VARIATIONS AVEC L'EMPLACEMENT DES ELECTRODES

Prenons deux petites électrodes de 3 c/m² et déplaçons-les en des points symétriques du membre supérieur, on constate alors que la force contre-électromotrice croît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la racine du membre.

TABLÉAU XVI

Electrodes de 3 cm² en des points symétriques.
Voltage : 140 v. ; Résistance : 26.000 ohms (pendule).

Durée du courant polarisant en 10 ⁻³ seconde	Région deltoïdienne	Région épicondylienne	Poignet, face dorsale	Main, face dorsale
—	—	—	—	—
0,2	19	20	24	30
0,4	22	24	34,5	42
1	15	20	28	35

Jusqu'ici, la plupart des auteurs ont admis que la peau était le siège presque exclusif de la force contre-électromotrice ; de telles expériences semblent prouver que l'ensemble des tissus interposés entre les électrodes contribue à produire la polarisation. Chanoz était arrivé à des conclusions semblables en mesurant la polarisation résiduelle, au bout de quelques secondes.

Il n'est pas niable cependant que la structure de la peau à l'endroit où se trouvent les électrodes ne joue un rôle important dans la manière dont évolue la force contre-électromotrice avec le temps. C'est ainsi que la paume de la main présente à ce point de vue une particularité entrevue déjà par les anciens auteurs, qui avaient observé une baisse de l'intensité avec le temps, au lieu d'une hausse, comme pour les autres parties du corps. Pour cette région, nous avons observé que, toutes choses égales d'ailleurs, la force contre-électromotrice continue à croître pendant un temps beaucoup plus long que pour les autres régions du membre supérieur. D'autre part, le maximum atteint est souvent un peu supérieur à celui obtenu dans les mêmes conditions au bras ou à l'avant-bras.

Par contre, à la face, la force contre-électromotrice s'est montrée en général plus faible et sa diminution plus précoce et plus accentuée qu'aux membres.

Cependant, comme il est difficile d'admettre une variation progressive dans les propriétés polarisantes de la peau, en allant de la racine du membre à la périphérie, nous pensons qu'il est plus logique de faire intervenir dans l'expérience précédente une polarisation tout le long du trajet du courant.

Lorsqu'on demande au sujet de joindre ses mains rendues humides pour réaliser un bon contact, on observe les faits suivants.

La force contre-électromotrice devient plus petite quand

les électrodes sont à la région deltoïdienne, ne change pas quand elles sont à la région sous-épicondylienne et devient plus grande quand elles sont au poignet.

Voici l'explication qu'on peut donner de ces faits d'apparence étrange. Dans le premier cas, il est créé une voie de dérivation par la jonction des mains. Celle-ci suffit pour faire baisser l'intensité à travers le corps et diminuer, de ce fait, la polarisation, mais n'a pas une intensité suffisante pour engendrer dans le nouveau circuit une polarisation supérieure à celle qui existait primitivement.

Dans le dernier cas, une très grande partie du courant passe par les mains, ce qui l'oblige à traverser quatre fois l'épiderme, notamment celui des régions palmaires spécialement polarisable. Ainsi s'explique l'augmentation de force contre-électromotrice.

Pour nous rendre compte du taux de participation de la peau à la production de la force contre-électromotrice, nous avons, chez l'animal, mesuré la grandeur de la polarisation avant et après l'ablation de la surface cutanée.

Sur un chien de 10 kilogs environ, on place deux petites électrodes, l'une sur la cuisse, l'autre à la partie supérieure du membre antérieur. On ajoute 10.000 ohms dans le circuit et l'on fait passer un courant polarisant sous 60 volts. On observe ainsi une polarisation qui, au bout de 2 millièmes de seconde, atteint la valeur maxima de 6,4 volts. On enlève alors la peau à l'emplacement des électrodes et on refait une mesure avec les mêmes conditions physiques, les électrodes reposant directement sur l'aponévrose musculaire. On obtient alors une force contre-électromotrice dont le maximum très étalé est atteint aux environs de 50 millièmes de seconde, et a pour valeur 1,8 volt.

Les fragments de peau conservés depuis leur enlèvement dans du sérum physiologique sont alors placés entre les électrodes, et donnent, avec un courant semblable, une polarisation de 4,3 volts environ. Si on laisse la peau séparée du corps pendant un temps un peu plus long, on voit la force contre-électromotrice baisser rapidement.

On doit conclure de cette expérience, qui a été reproduite deux fois avec les mêmes résultats, que la peau joue un rôle prépondérant dans la formation de la force contre-électromotrice.

Ce fait peut sembler en contradiction avec les données contenues dans le tableau XVI, où l'on voit la force contre-électromotrice augmenter notablement quand on écarte les élec-

trodes ; mais il faut remarquer que le courant peut, en traversant les tissus des membres, développer une force contre-électromotrice plus grande qu'en traversant un thorax et un abdomen où les voies de dérivation sont nombreuses.

VI. — DECROISSANCE DE LA POLARISATION A CIRCUIT OUVERT

Nous avons déjà dit que la baisse rapide de la polarisation après le passage du courant constitue la plus grande difficulté à vaincre pour l'étude de cette polarisation.

Pour étudier comment décroissait avec le temps la force contre-électromotrice, nous avons augmenté l'écart entre les clefs 3 et 4, ce qui a créé une période croissante pendant laquelle, le circuit du sujet étant ouvert, la polarisation se détruisait.

TABLEAU XVII

Electrodes de 3 cm² sur les avant-bras.
Durée du courant polarisant : 0,01 seconde ; Voltage : 45 v.
Résistances additionnelles : 1500 ohms (pendule).

Durée écoulée entre la fin du courant polarisant et le début de la mesure, en 10 ⁻³ seconde	Force contre-électromotrice en volts
—	—
0,1 environ	14
1	7
2	5
4	3,5
8	2
12	1,3

La figure 14, qui représente la traduction graphique de cette expérience montre, à première vue, une certaine ressemblance avec la courbe du voltage aux bornes d'un condensateur, se déchargeant dans un circuit sans self, en fonction du temps.

Dans cette expérience, l'intervalle entre l'ouverture du courant et la mise en opposition n'a pu être rigoureusement réduit à moins d'un dix-millième de seconde, et la durée d'opposition était du même ordre de grandeur. En tenant compte de ce temps perdu, et en extrapolant les courbes du côté de l'origine, on constate que la polarisation véritable, au moment de la cessation du courant, peut être de 3 à 4 volts plus élevée que celle donnée par cette mesure.

Lorsque l'on prolonge ces expériences, on voit, au bout d'un

temps relativement court, la polarisation tomber à un taux très bas.

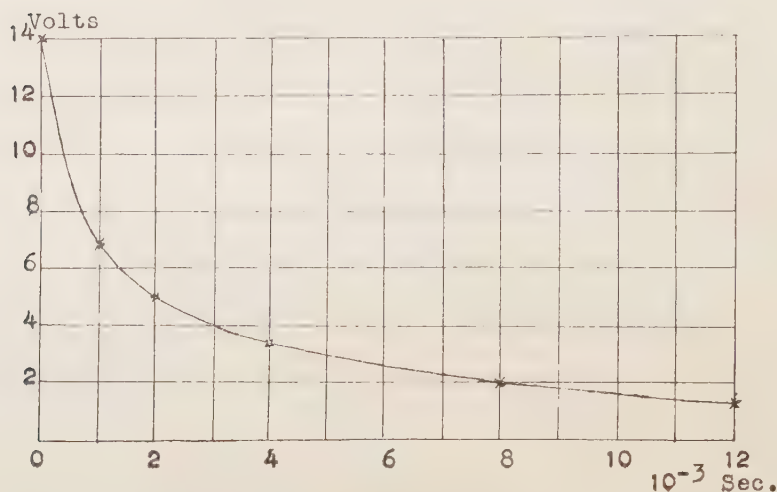


FIG. 14.

Courbe de décroissance de la force contre-électromotrice de polarisation en fonction du temps.

TABLEAU XVIII

Grande électrode au milieu du dos.

Petite électrode de 3 cm² sur la face externe de l'avant-bras.

Durée du courant polarisant : 0,001 seconde.

Durée de l'opposition : 0,0002 seconde.

Voltage : 20 v. ; Résistance : 7000 ohms (pendule).

Intervalle entre la fin du courant polarisant et la mesure, en 10 ⁻³ seconde	Force contre-électromotrice en volts
0,1 environ	9,8
7	2
18	1
7000	0,2

On comprend maintenant pourquoi Weiss et Chanoz, qui exécutaient leurs mesures plusieurs dixièmes de seconde après l'ouverture du courant, ont obtenu des valeurs si faibles pour la polarisation.

Il était intéressant de savoir si, en augmentant l'intensité du courant, on ne ralentirait pas la disparition de la polarisation, en admettant une plus grande pénétration des ions

dans les membranes intercellulaires. L'expérience montre qu'il en est bien ainsi, tout au moins lorsque l'on opère avec de larges électrodes (60 c. m²), et des courants agissant pendant un temps très court. Si l'on veut assimiler, avec certains auteurs, les tissus polarisés à un condensateur chargé, tout se passe alors comme si un accroissement de l'intensité du courant polarisant produisait une augmentation de la capacité de ce condensateur hypothétique.

En réalité, la polarisation des tissus présente des caractères qui la différencient nettement de la simple charge d'un condensateur.

Si l'on considère de près, en effet, la courbe de dépolarisation, on remarque une particularité qui nous a paru constante et sur laquelle nous voudrions attirer l'attention.

Tandis que la fonction exponentielle, qui exprime la décharge d'un condensateur, jouit de cette propriété que le rapport des ordonnées séparées par un même intervalle de temps est la même pour toutes les régions de la courbe, si l'on fait le calcul dans le cas de la dépolarisation, on voit que ce rapport va en décroissant avec le temps. Dans le cas où l'on considère des points de la courbe non équidistants, c'est l'expression $\frac{1}{t} \text{Log} \frac{V_1}{V_2}$ dans laquelle V_1 et V_2 représentent les longueurs de deux ordonnées consécutives et t la durée qui les sépare, qui doit être constante.

Nous avons calculé cette expression pour les points de la courbe obtenus expérimentalement et avons consigné dans le tableau ci-dessous les chiffres trouvés.

TABLEAU XIX

1 000	Log	$\frac{14}{7}$	=	693
1 000	Log	$\frac{7}{8}$	=	336
500	Log	$\frac{5.0}{3.5}$	=	178
250	Log	$\frac{3.5}{2.0}$	=	145
250	Log	$\frac{2.0}{1.3}$	=	108

Pour de plus longues durées, nous utiliserons les données

du tableau XVI, ce qui nous donne entre 0,018 et 7 secondes la valeur suivante :

$$\frac{1}{6,982} \text{ Log } \frac{1}{0,2} = 0,223$$

Enfin, pour des intervalles de l'ordre de la minute, nous avons eu recours aux chiffres donnés par Chanoz dans son important travail.

$$\text{Entre 30 sec. et 1 min. 30 sec. } \frac{1}{60} \text{ Log } \frac{435}{381} = 0,0022$$

$$\text{Entre 105 et 110 minutes..... } \frac{1}{300} \text{ Log } \frac{17}{15} = 0,0004$$

Nous sommes donc là en présence d'un caractère qui se retrouve à tous les instants de la dépolarisation. Il démontre l'énorme différence qui sépare cette décroissance de la décharge d'un condensateur, puisque l'expression calculée ci-dessus qui, dans le deuxième cas devrait être constante, varie ici dans la proportion de 1 à 10^6 . Nous verrons dans le dernier chapitre l'explication qu'on peut donner de ce mode de dépolarisation des tissus.

En terminant cette étude de la dépolarisation, nous voudrions dégager les éléments qu'elle nous apporte sur la précision des mesures de force contre-électromotrice. Pendant le temps perdu qui s'écoule pour la manœuvre de notre commutateur automatique, la polarisation baisse suivant une courbe analogue à celle que nous avons représenté figure 14. Or, si nous assimilons pour une faible durée cette courbe à une exponentielle, la vitesse de décroissance pourra être caractérisée par l'expression $\frac{1}{t} \text{ Log } \frac{V_1}{V_2}$. Le premier chiffre qui figure dans le tableau XIX n'est peut-être pas assez fort, puisque nous admettons qu'il y a pu avoir dans cette expérience une erreur assez considérable dans l'évaluation des durées. Cependant, si nous augmentons l'ordonnée à l'origine de 4 volts, nous obtenons comme valeur de l'expression ci-dessus le chiffre 944.

Or, dans le cas de la décharge d'un condensateur, ce chiffre représenterait l'inverse du produit RC . Si nous nous reportons aux expériences de contrôle que nous avons effectuées avec notre interrupteur à temps, nous remarquons que, dans le cas d'une capacité d'un microfarad se déchargeant dans

une résistance de 500 ohms, l'erreur était d'un demi-volt par défaut. Dans ce cas, le facteur $1/RC$ était égal à 2000. Donc, la rapidité de décroissance était plus grande que pour la courbe de dépolarisation. Comme nous n'avons jamais observé de dépolarisation plus rapide que dans l'expérience rapportée plus haut, nous sommes en droit de conclure que la précision des mesures de la force contre-électromotrice est bien de l'ordre d'un vingtième quand on se sert de l'interrupteur à chute.

CHAPITRE III

RECHERCHES SUR LA RÉSISTANCE INITIALE

I. — TECHNIQUE

Nous pensons avoir établi que la résistance apparente opposée par les tissus au passage du courant était due, pour une part très grande, à l'apparition d'une force contre-électromotrice de polarisation. Il n'en est pas moins vrai que, indépendamment de cette force contre-électromotrice, le corps humain doit posséder une certaine résistance, qui se manifestera notamment dès le début du passage du courant, avant que la force contre-électromotrice n'ait eu le temps d'apparaître, et s'ajoutera à tous moments aux autres résistances ohmiques placées dans le circuit.

Les auteurs allemands donnent volontiers à cette résistance du corps humain le nom de résistance *vraie*. Ce terme ne nous paraît pas devoir être conservé, car, suivant une hypothèse que nous discuterons plus loin, on peut admettre qu'il y a d'autres résistances que celles du début siégeant également dans les tissus et dont l'effet ne se fera sentir qu'au fur et à mesure du passage du courant.

Cette résistance initiale a déjà été l'objet de plusieurs travaux, et certains auteurs pensent l'avoir déterminée à l'aide de courants alternatifs de fréquence plus ou moins élevée. Nous avons déjà fait la critique d'une telle méthode. Il n'en est pas moins vrai que la résistance mesurée à l'aide des courants alternatifs rapides s'est montrée toujours plus petite que celle obtenue avec les courants à voltage constant, et que la valeur trouvée est, en général, d'autant plus faible que les courants employés étaient d'une fréquence plus grande.

Ces faits ont contribué à faire pressentir l'existence d'une polarisation considérable bien avant qu'on ait pu la mettre en évidence par des mesures directes.

Nous-même avons été amené, dans le chapitre I, à proposer une certaine valeur pour la résistance initiale du corps humain, qui n'était autre que la résistance apparente mesurée à l'aide de courants d'une durée d'un dix-millième de seconde. Mais nous avons fait observer à ce propos que le chiffre trouvé était vraisemblablement trop fort, car il conduisait à ce résultat paradoxal que la polarisation maxima diminuait quand le voltage s'élevait, jusqu'à devenir négative.

Nous avons repris la question avec une méthode différente, dérivée de celle que nous avons employée pour l'évaluation de la polarisation. En voici le principe.

Quand le courant émis par une source à voltage constant traverse le corps humain S et une résistance métallique sans self R , de telle sorte que l'une des électrodes soit reliée directement au pôle positif de la source (fig. 15), le voltage du

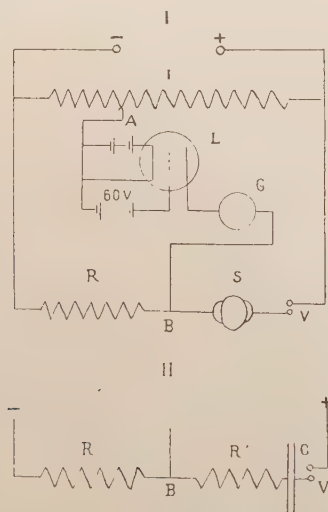


FIGURE 15.

I , réducteur de potentiel. — L , lampe à trois électrodes. — G , galvanomètre.
— S , sujet. — R , R' , résistances. — C , condensateur. — V , commutateur de l'égersimètre.

point B , situé entre la résistance R et le sujet, sera le plus élevé au moment du début du passage du courant, alors que la force contre-électromotrice n'a pas encore eu le temps d'apparaître. Au fur et à mesure que celle-ci apparaîtra, la différence de potentiel entre les électrodes augmentera, c'est-à-dire que le voltage du point B baissera de plus en plus jusqu'à un certain minimum pour croître ensuite de nouveau.

Le problème est donc le même que celui que nous avons eu à résoudre pour la mesure de la force électromotrice de polarisation : déterminer la valeur minima du voltage d'un point qui présente une différence de potentiel rapidement décroissante avec un point dont le voltage reste constant. Nous y sommes parvenu, d'une manière semblable, avec la lampe à trois électrodes, que nous avons intercalée en série avec un galvanomètre sensible entre le point B du circuit et un point A dont le voltage est maintenu à la valeur que l'on désire grâce à un réducteur de potentiel I .

Les connexions sont établies de telle façon que la plaque de la lampe soit en relation, par l'intermédiaire du galvanomètre, avec le point B et le filament avec le réducteur de potentiel. Il suffit de se reporter à ce que nous avons dit, à propos de la mesure de la force contre-électromotrice de polarisation (chapitre II) pour comprendre que, si l'on fait une série d'expériences en augmentant chaque fois d'une faible quantité, à partir de zéro, le potentiel du point A , il arrivera un moment où le galvanomètre cessera de dévier, et où le voltage du réducteur de potentiel est alors égal à la valeur maxima de celui du point B .

Lorsqu'on sera en possession de cette valeur, il suffira d'écrire que les chutes de potentiel dans le circuit du sujet et de la résistance métallique sont proportionnels aux résistances pour obtenir la résistance initiale du corps humain.

Comme pour la mesure de la force contre-électromotrice, nous avons eu soin d'intercaler une force électromotrice de 60 volts entre la grille et le filament, pour diminuer la résistance de la lampe, et nous nous sommes servi de l'égersimètre pour interrompre le courant un temps très court après son établissement, de manière à ramener la plaque à son potentiel initial.

Conditions de mesure optima. — Il est très important de rechercher quelle doit être la grandeur que l'on doit attribuer à la résistance R pour obtenir le maximum de précision dans

les mesures, en supposant une erreur donnée sur la valeur maxima du potentiel de B .

Appelons S la résistance du sujet, V la valeur du voltage de la source de courant et v la différence de potentiel aux extrémités de la résistance R . On a la relation suivante :

$$(1) \quad S = R \frac{V - v}{v}$$

Pour étudier comment varie S en fonction de v , prenons la dérivée de cette expression, en supposant R et V invariables. Il vient alors :

$$(2) \quad \frac{dS}{dv} = - \frac{RV}{v^2}$$

En remplaçant R par son expression tirée de la relation 1, nous obtenons :

$$(3) \quad \frac{dS}{S} = - \frac{V dv}{v(V-v)}$$

Cette dernière égalité indique comment varie l'erreur relative commise sur S , lorsqu'on commet une erreur très petite dv , sur la valeur du voltage v , évalué à l'aide du réducteur de potentiel.

Pour une certaine valeur de dv , cette erreur sera minima quand le produit $v(V-v)$ sera maximum, c'est-à-dire, puisqu'il s'agit du produit de deux nombres dont la somme est constante, quand les deux facteurs seront égaux. Cette condition sera remplie lorsque le voltage du point situé entre le sujet et la résistance sera égal à la moitié du voltage total, donc quand les deux résistances R et S seront égales au moment de la mesure.

Après avoir fait une première expérience avec une valeur de R quelconque, pour obtenir une notion approximative de la valeur de la résistance, nous avons procédé à une deuxième mesure plus précise en prenant pour R une valeur égale à celle précédemment trouvée pour le sujet.

Si l'on fait $v = \frac{V}{2}$ dans l'égalité (3), on obtient :

$$\frac{dS}{S} = - \frac{4 dv}{V}$$

Donc, si nous supposons que le potentiel v est connu avec une approximation de 0,25 volt, et si nous prenons V égal à

20 volts, on voit que l'erreur relative sur la résistance sera de 5 centièmes.

Le signe — placé devant le second membre de cette équation indique que l'erreur de la résistance sera par défaut si celle commise sur le voltage l'est par excès.

Approximation de la méthode. — Si les erreurs accidentelles, provenant de l'incertitude avec laquelle est déterminée la valeur de v sont assez faibles, il n'en est pas de même de l'erreur systématique introduite du fait que le galvanomètre demande une certaine quantité d'électricité minima pour dévier d'une manière appréciable.

Dans le but d'obtenir une estimation de l'erreur ainsi produite, nous avons institué une expérience de contrôle de la manière suivante :

Le sujet est remplacé par une deuxième résistance R' (fig. 15, II), mise en série avec un condensateur étalon C , dont une des armatures est reliée au pôle positif de la source. Lorsqu'on ferme le circuit, le condensateur se charge et les résistances sont parcourues par un courant de courte durée. Le point B présentera un voltage initial de $V \frac{R'}{R + R'}$, qui décroîtra suivant une loi exponentielle dont le décrément sera :

$$\frac{1}{(R + R') C}$$

En faisant varier la capacité du condensateur, on modifiera la vitesse de décroissance du potentiel.

Nous avons mesuré la résistance R' à l'aide de la méthode précédemment décrite, ce qui nous a permis de comparer le résultat trouvé à la valeur réelle de cette résistance. Les résultats des expériences effectuées avec différentes valeurs de la capacité sont consignés dans le tableau ci-dessous :

TABLEAU XX

Voltage de la source : 20 v. ; $R = R' = 500$ ohms
(interrupteur à chute).

C en microfarad	Valeur de $\frac{V_0}{(R + R') C}$	Voltage max. du point B en volt.	Résistance R' mesurée en ohms
—	—	—	—
1	10 000	9,8	520
0,5	20 000	9,4	563
0,3	33.333	9,2	587
0,2	50.000	8,8	636
0,2	100 000	8,5	676

Conformément à ce que l'on devait prévoir, on constate que, plus la capacité du condensateur devient faible, plus l'intensité du courant de charge décroît rapidement, plus la mesure du potentiel maximum du point *B* est en dessous du chiffre réel et plus l'erreur commise par excès sur la valeur de *R'* est forte.

Ajoutons que, lorsqu'on effectue ces mêmes mesures de contrôle en changeant le voltage de la source entre de larges limites, on obtient comme valeur de *R'* des chiffres tout à fait du même ordre.

Pour connaître, à l'aide des données précédentes, le degré d'approximation des mesures, dans le cas où le corps humain est dans le circuit, il faut savoir avec quelle vitesse s'établit la force contre-électromotrice dans les tissus. Il résulte de nos expériences que, lorsqu'il y a une résistance de 500 ohms en série avec le sujet, la force contre-électromotrice croît, pour un voltage extérieur de 20 volts, de 3 volts environ par dix-millième de seconde ; ce qui constitue une rapidité de 30.000 volt-seconde. Or, la rapidité avec laquelle décroît le voltage du point *B*, dans nos expériences de contrôle, est représentée par le coefficient angulaire de la tangente à l'origine de la courbe de ce voltage en fonction du temps et a pour expression : $\frac{V_0}{(R + R')c}$, (*V*₀ étant le voltage initial.)

En se reportant au tableau XX, on constate que c'est lorsque la capacité est de 0,3 à 0,5 microfarad que les deux vitesses sont semblables.

L'erreur commise dans la mesure de la résistance du sujet est donc comprise entre celles que nous observons pour ces conditions expérimentales, c'est-à-dire entre 12 à 17 %.

Une telle approximation peut paraître assez faible, mais si l'on veut bien considérer qu'il s'agit là d'une erreur systématique dont on peut tenir compte dans une certaine mesure et que d'ailleurs, même affectés de cette erreur, les nombres auxquels on parvient restent, quoique approchés par excès encore bien inférieurs à toutes les valeurs obtenues jusqu'ici avec des courants continus, on reconnaîtra que cette méthode constitue un réel progrès pour la détermination de la résistance initiale du corps humain.

II. — RESULTATS EXPERIMENTAUX

1° RÉSISTANCE INITIALE SUIVANT LES DIMENSIONS DES ÉLECTRODES. — Ayant surtout en vue l'application de ces mesures aux questions d'électro-physiologie, nous nous sommes placé dans les conditions ordinaires de l'exploration électrique des nerfs et des muscles chez l'homme et de l'utilisation thérapeutique du courant électrique.

Nous donnons ci-dessous les résultats de quelques mesures effectuées avec des électrodes de dimensions variables.

TABLEAU XXI

- I. Sujet J. L. — Une électrode de 180 cm² dans le dos,
une de 3 cm² sur la face externe du bras.
Voltage : 25 v.

<i>v</i> . Résistance initiale en ohms du sujet et des électrodes	<i>R</i> . Résistance apparente en ohms
505	4.555

- II. Sujet J. L. — Deux électrodes de 3 cm² au niveau des deltoïdes.
Voltage : 25,5 v.

<i>v</i>	<i>R</i>
624	2 485

- III. Sujet J. L. — Deux électrodes de 180 cm² sur les faces externes
des deux bras.
Voltage : 16,3 v.

<i>v</i>	<i>R</i>
460	4.987

Les résistances apparentes ont été calculées d'après la loi d'Ohm, en partant de l'intensité lue au bout de quelques secondes sur un milliampèremètre.

Ce qui frappe tout de suite, c'est la différence considérable qu'il y a entre la résistance initiale et la résistance apparente au bout d'un certain temps. Cela prouve que la majeure partie de la résistance opposée à la pénétration du courant dans les tissus est due aux actions secondaires engendrées par le courant lui-même.

Pour avoir la résistance propre du corps humain, il faut déduire des valeurs trouvées les résistances des électrodes. Nous les avons mesurées par la même méthode, de manière à ne pas faire intervenir dans l'estimation de ces grandeurs

les phénomènes secondaires, d'ailleurs toujours faibles en regard des voltages employés, qui doivent se produire au niveau d'électrodes qui ne sont pas rigoureusement impolarisables.

Nous avons trouvé que chacune des grandes électrodes avait une résistance d'environ 15 ohms, et chacune des petites une résistance de 100 ohms environ.

Si donc l'on soustrait 115 ohms de la résistance initiale de l'expérience I, 200 ohms pour la deuxième expérience et 30 ohms pour la dernière, on remarque que, lorsque les électrodes sont placées à peu près au même endroit, la résistance du sujet est d'autant plus grande que les surfaces d'entrée et de sortie du courant sont plus petites, ainsi qu'on devait s'y attendre.

Les conditions expérimentales n'ont pas été précisées suffisamment pour qu'on puisse décider s'il y a ou non proportionnalité entre la surface des électrodes et la conductibilité initiale. Il semble cependant que la relation entre ces grandeurs soit plus étroite que lorsque l'on considère la résistance apparente aux courants de longue durée.

2° **RÉSISTANCE INITIALE SUIVANT L'EMPLACEMENT DES ÉLECTRODES.** — Lorsque l'on déplace, symétriquement, deux petites électrodes de 3 cmq le long des membres supérieurs, on constate que la résistance croît en même temps que l'on s'éloigne de la racine du membre.

TABLEAU XXII

Voltage : 25,5 v.

Résistance additionnelle : 1000 ohms.

Situation des deux électrodes de 3 cmq.	Résistances du sujet et des électrodes	Résistances des électrodes	Résistances du sujet
Région deltoïdienne	624	200	424
Région externe du coude.. . . .	760	200	560
Eminence thénar	1428	200	1228

Il serait cependant imprudent d'en conclure que la résistance est toujours une fonction croissante de l'écart existant entre les électrodes. La nature des tissus que rencontre le courant doit naturellement influencer sur la résistance, comme elle influe sur la polarisation. Néanmoins, il semble que la

résistance initiale ne varie pas autant que la polarisation avec la structure des tissus interposés entre les électrodes. Nous avons relaté, dans la première partie de ce travail, l'expérience de Vigouroux [6], montrant que la résistance est moindre quand on met des électrodes sur chaque bras que si on les place toutes deux de part et d'autre du même membre.

Nous avons refait cette expérience et l'avons vérifiée, tout au moins en ce qui concerne les résistances apparentes, les seules que considérait Vigouroux.

C'est ainsi que, si l'on place deux petites électrodes de 3 cmq sur les faces palmaire et dorsale de la main gauche, on trouve comme valeur de la résistance apparente le chiffre considérable de 50.700 ohms, tandis que si l'on place une électrode sur la face palmaire de la main gauche et l'autre sur la face dorsale de la main droite, cette même résistance n'est plus que de 17.500 ohms.

Si maintenant nous mesurons, par la méthode précédente, la résistance initiale, nous trouvons au contraire, que, dans le premier cas, elle est de 400 ohms et dans le deuxième de 1380 ohms. Cette expérience nous montre que la résistance apparente est constituée surtout par des phénomènes de polarisation et que cette dernière, comme on devait le prévoir, d'après les travaux de Hermann, est plus grande quand le courant pénètre dans les muscles en travers et rencontre un nombre plus considérable de membranes organisées.

Dans certains cas, la polarisation initiale peut tomber à un taux très bas. C'est le cas, notamment, où l'on met de larges électrodes de 180 centimètres carrés sur les faces antérieure et postérieure du thorax. Nous l'avons vu alors atteindre la valeur de 60 ohms environ ; tandis que la résistance apparente était encore de 650 ohms.

3° **RÉSISTANCE INITIALE SUIVANT LE VOLTAGE.** — Il nous a paru intéressant de rechercher si la résistance initiale est, comme les résistances qui obéissent à la loi d'Ohm, indépendante du voltage avec lequel on effectue les mesures. Aussi, dans une série d'expériences, avons-nous fait varier le voltage de la source entre de larges limites, en laissant constantes les autres conditions expérimentales. Voici les résultats obtenus.

TABLEAU XXIII

Sujet L. M. — Grande électrode de 180 cm² dans le dos,
petite de 3 cm² sur la face antérieure de l'avant-bras.
Résistance additionnelle : 500 ohms (interrupteur à chute).

Voltage	Résistance du corps humain
20 volts	493 ohms
30 —	497 —
40 —	469 —
50 —	453 —
60 —	450 —

Les chiffres de la résistance du corps humain, le deuxième mis à part, présentent une variation de sens inverse au voltage. Nous croyons néanmoins qu'il serait imprudent d'en conclure à une décroissance de cette résistance lorsqu'on augmente le voltage. Remarquons, tout d'abord, que les écarts entre les chiffres obtenus sont en général inférieurs à 10 %, c'est-à-dire restent en deçà de l'erreur systématique que nous avons admise pour ce genre de mesure. Mais il y a une autre raison qui nous donne à penser qu'il n'y a pas lieu de tenir compte de ces différences. C'est la suivante : nous avons vu que, dans nos expériences de contrôle, les mesures de résistance sont sensiblement indépendantes du voltage employé. Il en serait sans doute de même pour le corps humain si les ordonnées des courbes de polarisation en fonction du temps étaient proportionnelles aux voltages utilisés. En réalité, nous savons qu'elles croissent moins vite que les voltages. Il en résulte que la quantité d'électricité nécessaire pour faire dévier le galvanomètre d'une manière appréciable doit être réalisée pour des variations de voltage proportionnellement plus faibles lorsque les voltages sont élevés. Autrement dit, les mesures présenteront une erreur relative moins grande pour les hauts voltages, et comme cette erreur est toujours par excès, on comprend pourquoi les valeurs trouvées pour la résistance diminuent quand on augmente la tension aux extrémités du circuit.

Nous concluerons donc que rien ne nous permet actuellement d'affirmer une variation de la résistance avec le voltage et que, si elle existe, elle doit être, dans tous les cas, assez petite et certainement beaucoup plus faible que celle observée pour les résistances apparentes mesurées au bout de quelques secondes.

Rappelons à ce propos que, pour des durées de l'ordre

du dix-millième de seconde, nous avons observé à l'aide de la méthode balistique (chapitre 1) des variations de la résistance apparente de un à trois dixièmes, quand on double simplement le voltage.

4° RÔLE DE LA PEAU DANS LA RÉSISTANCE ÉLECTRIQUE INITIALE.

— Nous avons relaté comment Jolly, enlevant la peau par un vésicatoire, vit la résistance apparente baisser considérablement. Ce fait concorde avec notre observation que la peau est le siège principal des forces contre-électromotrices.

En est-il de même pour la résistance initiale ? La question n'a, croyons-nous, jamais été résolue. Au cours des expériences que nous avons faites sur le chien et qui ont été rapportées au chapitre précédent, nous avons mesuré les résistances initiales de l'animal intact, de l'animal privé de sa peau au niveau des électrodes, et des deux lambeaux de peau enlevés et mis l'un contre l'autre, entre les électrodes.

Nous avons obtenu : 410 ohms dans le premier cas, 300 dans le second et 210 pour le troisième.

On remarque tout de suite que la somme des deux derniers chiffres est supérieure au premier, ce qui semble à première vue une impossibilité. En réalité, cela doit tenir à ce que la peau séparée du corps a été maintenue, une demi-heure environ avant les mesures, dans du sérum physiologique d'une température (22°) inférieure à celle du corps. Cet abaissement de température nous paraît capable d'avoir produit une augmentation de la résistance initiale. Quoi qu'il en soit, ces mesures permettent de conclure que, dans les conditions de nos expériences, la peau, loin de posséder une résistance initiale considérable, a une résistance plus faible que l'ensemble des autres tissus traversés par le courant. La résistance apparente énorme qu'elle acquiert ultérieurement sous l'influence du passage du courant est due aux phénomènes de polarisation interne dont elle est le siège.

5° RÉSISTANCE DU CORPS HUMAIN APRÈS LE PASSAGE D'UN COURANT CONTINU.

— Nous avons également étudié comment se comporte cette résistance initiale quand le sujet a déjà été traversé par un courant d'une certaine durée.

A. — Dans une première série d'expériences, nous avons mesuré la résistance initiale du courant, premièrement avant tout passage de courant, puis après action d'un courant d'assez longue durée et interruption de celui-ci pendant un temps très court de l'ordre de la seconde. Dans ces condi-

tions, on constate que le courant continu ne semble pas entraîner de modifications durables dans ce que nous avons appelé la résistance initiale.

Voici les résultats de deux expériences faites à ce sujet :

TABLEAU XXIV

I. Sujet J. L. — Electrode de 180 cm² dans le dos, électrode de 3 cm² sur la face interne de l'avant-bras.

	Voltage de la source	Voltage max. du point B	Résistance du sujet et des électrodes
Avant le passage du courant.	25 volts	12,8 volts	665 ohms
Après passage, pen- dant une minute. .	—	12,1 —	742 —

II. Sujet J. L. — Electrode de 180 cm² dans le dos,
électrode de 3 cm² sur la face antérieure du bras.

	Voltage de la source	Voltage max. du point B	Résistance du sujet et des électrodes
Avant le passage du courant	40,5	4,9 volts	798 ohms
Après passage, pen- dant une minute...	—	4,7 —	861 —

Les différences constatées dans les deux valeurs de la résistance, avant et après le passage du courant, peuvent paraître assez notables pour qu'on soit tenté de conclure à une légère augmentation de résistance sous l'action prolongée du courant. Cependant, si l'on considère les chiffres contenus dans la deuxième colonne, on se rend compte que l'abaissement de la valeur maxima du voltage du point B n'a été que de 0,7 volt pour la première expérience et de 0,2 volt pour la deuxième.

Or, nous avons vu que, d'après les recherches de Hermann, Weiss et Chanoz, c'est l'ordre de grandeur de ce qu'il reste de la force contre-électromotrice de polarisation après une interruption du courant de cet ordre. Nous sommes donc fondé à admettre que les variations constatées sont attribuables à ce résidu de polarisation, suffisant pour causer une augmentation apparente de la résistance de l'ordre de grandeur observé.

Il semble donc peu probable que le courant modifie, tout au moins d'une manière appréciable à nos mesures, la résistance initiale du corps humain.

B. — Si, au bout d'une certaine durée de passage du courant, nous pouvons connaître la valeur de la force contre-électromotrice de polarisation (e) et celle de l'intensité du courant (I), rien ne sera plus simple que de calculer, à partir

de la formule $r = \frac{E-e}{I}$, où E figure le voltage de la source,

la résistance ohmique r du circuit à ce moment-là. En comparant alors le résultat trouvé au chiffre de la résistance initiale préalablement déterminé, on vérifiera si, à côté de la polarisation, il y a une résistance constante pendant le passage du courant.

Voici comment nous avons réalisé ces différentes déterminations. La mesure de la résistance initiale est faite suivant la méthode précédemment décrite. On fait ensuite passer le courant en lisant l'intensité sur un milliampèremètre sensible.

On voit cette intensité augmenter progressivement avec la durée du courant. Au bout d'un certain temps, on manœuvre l'appareil à chute, avec lequel on effectue la mesure de la force contre-électromotrice de polarisation. Comme cette dernière opération nécessite plusieurs essais, on a soin de déclancher la chute de la masse lorsque l'aiguille du milliampèremètre atteint chaque fois la même graduation.

Dans le tableau XXV figurent les grandeurs suivantes :

- 1° E , le voltage de la source de courant ;
- 2° P , la résistance supplémentaire mise en série avec le sujet ;
- 3° I , l'intensité du courant exprimée en ampères ;
- 4° e , la force contre-électromotrice mesurée au moment où l'intensité a la valeur I ;
- 5° R , la résistance initiale du sujet mesurée directement ;
- 6° r , la résistance calculée à partir de la formule précédente, déduction faite de la résistance P ;
- 7° U , la résistance apparente du corps humain calculée d'après la loi d'Ohm, à partir de I et de E .

On constate, d'après ce tableau, que la résistance du corps humain paraît avoir augmenté légèrement. Cependant, là encore, il ne faut pas se hâter de conclure. Il convient, en effet, d'observer que cet accroissement peut n'être qu'apparent et provenir d'une erreur par défaut dans la mesure de la force contre-électromotrice. Dans les expériences mentionnées ci-dessus, une erreur d'un volt, et parfois moins, suf-

firait à expliquer l'écart entre les chiffres observés et calculés pour la résistance du sujet.

TABLEAU XXV (*Egersimètre*)

I. — Grande électrode dans le dos, petite, face antérieure de l'avant-bras.	E	P	I	e	R	r	U
	49,5	700	0,003	44,5	628	966	5800
II. — Grande électrode : idem, petite, éminence thénar.	49 5	700	0,0041	47,3	816	4300	47030
III. — Grande électrode : idem, petite, bord radial de l'avant-bras.	20,0	700	0 0027	46,0	573	784	6707

D'ailleurs, si l'on compare les deux valeurs de r et de U , on constate que la première de ces grandeurs est très petite devant la seconde, c'est-à-dire que, même si la variation de résistance est bien réelle, elle est très faible par rapport à l'accroissement de résistance apparente produit par la polarisation.

Ceci nous permet de répondre partiellement à la question suivante : Dans quelle mesure les modifications de la résistance apparente des tissus, au cours du passage d'un courant électrique, sont-elles liées à l'apparition d'une force contre-électromotrice de polarisation ?

Jusqu'ici, les avis sont restés partagés. Alors que certains auteurs pensent encore, avec Leduc, qu'il s'agit d'une variation réelle de la résistance due à la pénétration des ions de l'électrode dans la peau, d'autres, avec Gildemeister, croient que la résistance proprement dite reste constante et que les variations observées dans la conductibilité sont dues à des phénomènes de polarisation.

Nous sommes autorisé à conclure de nos expériences que les modifications de la conductibilité sont en majeure partie, sinon en totalité, en relation avec la force contre-électromotrice engendrée par l'action polarisante du courant sur les tissus.

Il sera donc possible, ayant déterminé la résistance initiale du sujet, de connaître à chaque instant la valeur de la polarisation par une détermination de l'intensité du courant polarisant. Cette intensité sera donnée simplement par un galvanomètre ordinaire, pour de longues durées de passage du

courant, et par des méthodes balistique ou oscillographique pour des durées plus brèves.

C'est sur ce principe que nous avons, dans le chapitre I, calculé la force contre-électromotrice de polarisation à partir des courbes de conductibilité. Mais le chiffre que nous avons admis pour la résistance initiale était certainement exagéré.

Si l'on reprend le calcul en prenant pour cette grandeur la valeur de 700 ohms, qui est à peu près celle que l'on observe dans les conditions où l'expérience a été faite, l'on obtient les chiffres consignés dans le tableau ci-dessous.

TABLEAU XXVI

Mêmes conditions expérimentales que pour le tableau VII.

Durée en 10^{-3} seconde	Différence de potentiel		
—	20 v	40 v	80 v
0,1	16,6	29	42
0,26	19,2	31	40,3
0 52	19,5	29,6	38
0,78	19,2	28	
1,04	19	27,9	
1,56	18,86	27,4	
2,08	18,79	26,9	
Environ 3 secondes	12 75		

Nous avons représenté, en pointillé, sur la figure 6 (p. 51), les courbes qui traduisent les résultats de ce tableau. En les considérant, on retrouve aisément toutes les constatations faites au chapitre II, sur les modifications qui existent dans l'évolution de la force contre-électromotrice suivant la durée d'action du courant et le voltage de la source.

Cette concordance entre des résultats obtenus par des méthodes essentiellement différentes donne à penser que les conclusions auxquelles nous ont conduit nos expériences sont bien l'expression approchée de la réalité.

En somme, la résistance initiale, qui ne constitue qu'une fraction très faible de la résistance apparente aux courants continus de longue durée, est une grandeur physique qui se rapproche beaucoup plus que cette dernière de la résistance électrique des métaux et des électrolytes.

En rapport avec les dimensions des portes d'entrée et de sortie du courant, ainsi qu'avec l'épaisseur de tissus interposés entre les électrodes, elle ne paraît pas dépendre sensiblement du voltage sous lequel est émis le courant. Peu

influencée par les courants qui ont antérieurement traversé le sujet, et à peu près égale à la résistance propre des tissus, calculée en retranchant du voltage extérieur la force contre-électromotrice de polarisation, elle peut être envisagée comme un élément sensiblement constant de la résistance électrique de l'organisme vivant.

En première approximation, nous la considérerons comme obéissant aux lois d'Ohm.

INFLUENCE DE LA POLARISATION SUR LA MESURE DE L'EXCITABILITÉ ÉLECTRIQUE

La mesure de l'excitabilité électrique repose sur la notion du seuil d'excitation, que l'on définit par les facteurs physiques d'un courant provoquant la contraction minima d'un muscle, soit directement, soit par l'intermédiaire de son nerf.

Ces facteurs physiques doivent caractériser le courant exciteur complètement, c'est-à-dire en faire connaître l'intensité aux différents instants, ou plus brièvement la forme.

En réalité, comme l'excitation est terminée au bout d'un temps très court, de quelques millièmes de seconde, ce qu'il importe surtout de connaître, c'est la forme du courant dans les premiers instants qui suivent la fermeture du circuit d'excitation.

Quand on expérimente sur un animal, il est relativement facile de se mettre dans des conditions telles que l'intensité du courant soit connue au moment de l'excitation. Il suffit d'isoler le nerf ou le muscle, de les placer sur des électrodes impolarisables et de mettre en série, avec la préparation, des résistances ohmiques suffisantes pour que la force électromotrice qui agit aux extrémités du circuit soit très grande vis-à-vis de la force contre-électromotrice forcément minime qui prend naissance dans le fragment de tissu interposé entre les électrodes.

Quand on explore un nerf ou un muscle chez l'homme, au contraire, l'on est bien forcé d'opérer à travers la peau. Il en résulte tout d'abord l'obligation d'employer des intensités beaucoup plus grandes, la majeure partie du courant diffusant dans des tissus étrangers au processus d'excitation, ce qui entraîne l'obligation de mettre en jeu des différences de

potentiel également plus élevées. Enfin la présence d'une plus grande quantité de tissus, et surtout de la peau, entre les électrodes est la cause de l'apparition d'une force contre-électromotrice qui peut atteindre 90 % et plus du courant exciteur. (Voir chapitre II.) Dès lors, l'on a affaire à un courant qui ne présente plus aucune relation algébrique simple avec le voltage de la source. Cela constitue une source d'erreurs importantes dans la mesure des seuils d'excitation évalués soit par le voltage aux extrémités du circuit, soit par l'intensité lue sur un milliampermètre, à un moment où l'effet excito-moteur du courant est terminé. Le moyen le plus simple de remédier à la variation d'intensité produite par la polarisation sur un courant émis à voltage constant, est d'ajouter des résistances supplémentaires dans le circuit, afin d'élever le voltage de la source suffisamment pour que la force contre-électromotrice ne soit qu'une fraction assez faible de celui-ci. On arrive ainsi à réaliser des courants plus ou moins bien rectifiés suivant le voltage maximum dont on dispose et l'intensité qu'il est nécessaire de mettre en jeu pour obtenir la contraction minima.

Nous passerons brièvement en revue les principales modifications qu'entraîne la polarisation sur l'excitabilité, en comparant les facteurs physiques du courant exciteur, suivant que l'on fait varier l'importance de la force contre-électromotrice par rapport au voltage de la source, en modifiant la résistance du circuit.

Pour éviter les redites, nous exposerons d'abord les faits observés, puis, à la fin, nous essaierons d'en donner une explication d'ensemble.

I. — INFLUENCE DE LA POLARISATION SUR LA QUANTITE D'ELECTRICITE QUI PRODUIT L'EXCITATION DANS UN TEMPS DONNE.

Lorsque l'on pratique l'excitation au moyen de courants de durées connues et que l'on mesure en même temps, à l'aide d'un galvanomètre balistique, la quantité d'électricité qui passe dans le circuit, on s'aperçoit que cette quantité liminaire est plus élevée quand on augmente le voltage de la source en ajoutant des résistances dans le circuit.

Cela ressort nettement de l'expérience mentionnée ci-dessous.

TABLEAU XXVII

Sujet M. B. — Exploration du muscle fléchisseur superficiel
(interrupteur à chute).

Durée du courant en 10 ⁻³ seconde	QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ LIMINAIRE	
	Résistance additionnelle 500 ohms	Résistance additionnelle 10.000 ohms
0,25	0,8	1,4
5 2	1,4	1,8
15 6	3 4	3,8
26	5	6,3
36,4	6,5	8
46 8	8,6	9,7
Voltage rhéobasique	18 volts	57 volts

Evidemment, même lorsque l'on ajoute 10.000 ohms en série avec le sujet, la force contre-électromotrice reste une fraction importante du voltage d'excitation ; il n'en est pas moins vrai que son importance relative est moindre que lorsque l'on ajoute seulement 500 ohms. L'augmentation de la quantité d'électricité liminaire avec le voltage nous a paru un fait général qui concorde d'ailleurs avec nos connaissances sur l'excitation électrique, ainsi que nous le montrerons plus loin.

II. — RELATION ENTRE LE VOLTAGE D'EXCITATION ET LES RESISTANCES ADDITIONNELLES DU CIRCUIT

Lorsque l'on augmente les résistances qui se trouvent dans le circuit d'excitation, on se place dans l'obligation, pour obtenir le seuil, d'accroître le voltage de la source de courant. Si le corps humain obéissait à la loi d'Ohm, les accroissements de voltage seraient proportionnels aux accroissements de résistance. Or, il n'en est rien. Si l'on construit la courbe des voltages en fonction des résistances additionnelles, on obtient le plus souvent une ligne ayant la forme d'un S allongé, avec une double courbure, la première à concavité dirigée vers l'axe des résistances, la deuxième à concavité diri-

gée vers l'axe des volts. En d'autres termes, le rapport —

va d'abord en décroissant, passe par un minimum pour croître ensuite de nouveau légèrement. La seconde partie de la courbe, à partir de l'inflexion, peut quelquefois ne pas apparaître quand le voltage de la source reste inférieur à une centaine

de volts. Par contre, la courbure du début nous a paru un phénomène constant.

III. — RELATION ENTRE L'INTENSITE RHEOBASIQUE ET LES RESISTANCES ADDITIONNELLES DU CIRCUIT

D'après Huet (1), le seuil galvanique augmente quand on ajoute, en série avec le sujet, des résistances croissantes.

D'après nos expériences, cette augmentation serait loin d'être constante. On l'observerait, en général, sur les muscles de petite chronaxie et de seuil bas, mais, pour les autres muscles, ce serait assez souvent l'inverse. Il faut d'ailleurs noter que lorsqu'il y a peu de résistances en série avec le sujet, l'intensité rhéobasique lue sur un milliampèremètre est assez mal définie, puisqu'elle augmente pendant tout le passage du courant. Nous avons toujours considéré dans nos expériences l'intensité liminaire lue dans le temps le plus court.

IV. — RELATION ENTRE LE TEMPS UTILE ET LES RESISTANCES ADDITIONNELLES DU CIRCUIT

Avec Lapicque, nous appellerons *temps utile* la durée minima pendant laquelle doit passer un courant continu pour donner le seuil rhéobasique. Lorsque l'on a affaire à des courants parfaitement constants, comme ceux que l'on peut faire agir sur les animaux, il y a, ainsi que l'a montré Lapicque, un rapport assez constant entre le temps utile et la chronaxie, le premier ayant une durée environ dix fois plus grande que la deuxième. Il n'en est plus de même quand les courants sont déformés par la polarisation.

Le plus ordinairement, le temps utile baisse quand on diminue simultanément le voltage et la résistance du circuit jusqu'à pouvoir tomber à quelques dix-millièmes de seconde.

Toutefois, il est à remarquer que, dans certains cas, qui concernent souvent des muscles à chronaxie normalement élevée ou des muscles en voie de dégénérescence, on peut observer une diminution du temps utile quand on augmente le voltage.

Ce qui est intéressant, c'est que la valeur obtenue pour des

(1) Cité par Bourguignon dans *La Chronaxie chez l'Homme*, Paris, Masson, 1923, p. 68.

voltage très élevés est environ dix fois plus grande que la chronaxie mesurée dans les mêmes conditions, tandis que, pour des voltages relativement bas, deux cas peuvent se produire. Ou bien le temps utile est trop faible, et alors il croîtra quand on augmente la résistance du circuit, ou il est trop grand, et alors il décroîtra avec l'accroissement de résistance.

La chronaxie, mesurée à l'aide des courants émis sous un voltage constant, varie dans le même sens que le voltage de la source et la résistance du circuit. C'est là un fait que nous avons maintes fois observé, et qui d'ailleurs est conforme à ce que nous savons de la polarisation.

Rappelons que la chronaxie se mesure en recherchant quelle est la durée que doit avoir un courant ayant une intensité double de la rhéobase pour amener le muscle au seuil de l'excitation. Pour obtenir un courant d'intensité double du seuil rhéobasique, on se contente, en pratique, de doubler le voltage, ce qui consiste à supposer que le circuit d'excitation obéit à la loi d'Ohm. Il n'en est pas ainsi à cause de la présence de la force contre-électromotrice de polarisation. Comme cette dernière croît moins vite que le voltage, il en résulte que, lorsqu'on double le voltage, on fait passer dans le circuit une quantité d'électricité plus grande que celle qui serait mise en jeu dans le cas où l'intensité serait doublée. Il doit en résulter, d'après la loi d'excitation électrique, que ce courant devra passer pendant moins de temps pour provoquer le seuil d'excitation que le courant plus faible qui devrait servir à mesurer la chronaxie. La durée efficace du courant émis sous un voltage double de celui du seuil galvanique étant prise comme mesure de la chronaxie, on conçoit que le chiffre trouvé soit trop faible, et cela d'autant plus que l'importance de la force contre-électromotrice est plus grande, c'est-à-dire que le voltage d'excitation est plus bas. Bourguignon pense qu'on diminue suffisamment cette cause d'erreur, due à ce qu'il appelle la variation de résistance électrique du corps humain, en ajoutant 20.000 ohms en série avec le sujet. Il n'en est rien lorsque, malgré cette résistance, les seuils sont suffisamment bas pour que l'excitation puisse être réalisée avec des voltages peu élevés. C'est ce que prouve le tableau suivant, extrait d'une note publiée en commun avec MM. Delheirm et Laquerrière (1).

(1) Importance de hauts voltages pour la mesure de la chronaxie. (Société française d'Electrothérapie, 25 mars 1924.)

TABLEAU XXVIII

Sujet M. B.

	Résistance en série	Voltages rhéobasiques	Chronaxie en 10^{-3} seconde
Biceps gauche..	20 000	33	0,40
	55 000	89	0,25
Biceps droit...	20 000	30	0,125
	55 000	61	0,175
	70 000	81	0,20
Deltoïde gauche.	20 000	52	0,225
	40.000	90	0 30

Ce sont les valeurs obtenues avec les plus hauts voltages, pour lesquels l'importance relative de la polarisation est la plus faible, qui doivent se rapprocher le plus de l'exactitude. Ce tableau révèle que les erreurs commises en utilisant des voltages trop faibles peuvent atteindre jusqu'à 60 %, et modifier, en conséquence, les conclusions de l'électro-diagnostic.

Récemment deux auteurs belges, Verryp et Colle [26], ont retrouvé cette augmentation de la chronaxie avec la résistance du circuit, même en opérant sur un cœur de grenouille extrait de l'organisme. Suivant eux, la chronaxie de cet organe s'élève de 25 à 45, puis à 55 millièmes de seconde, quand on donne à la résistance additionnelle du circuit les valeurs de 100.000, 1.000.000 et 100.000.000 ohms, correspondant à des voltages de 0,47, 2,8 et 44 volts.

Cette expérience prouve bien que c'est avant tout le voltage de la source qui doit être élevé et que la résistance du circuit doit avoir simplement la valeur qu'il faut pour obtenir ce résultat.

Pour comprendre comment la force contre-électromotrice de polarisation peut influencer les conditions de l'excitation, il faut avoir présent à l'esprit la loi d'excitation électrique de Weiss, suivant laquelle le muscle n'entrera en contraction que si, dans un temps t , il est mis en jeu une quantité d'électricité Q telle que ces deux grandeurs soient liées entre elles par une équation de la forme :

$$Q = + a bt$$

dans laquelle a et b sont des coefficients numériques.

Cette relation a le mérite de représenter les faits avec simplicité et une approximation suffisante, tout au moins entre

certaines limites de durée. Cependant, il n'est pas absolument exact que tous les courants qui émettent la même quantité d'électricité dans le même temps aient la même efficacité physiologique. Lapique [27], comparant l'effet excitateur des décharges de condensateur et des courants continus, prouve que, à égalité de durée, les premiers nécessitent une quantité moindre d'électricité pour produire la contraction musculaire. Reprenant la question avec les courants à échelons, c'est-à-dire des courants continus qui présentent une variation brusque d'intensité, nous avons établi que, pour des durées égales, une onde est d'autant plus efficace qu'elle présente une plus grande variation d'intensité, et que ce sont les courants continus qui nécessitent la plus grande quantité d'électricité pour amener le muscle au seuil de l'excitation.

C'est la raison pour laquelle les courants émis à bas voltages, qui présentent du fait de la polarisation une variation d'intensité plus grande que ceux obtenus avec des voltages élevés, excitent le muscle, avec des quantités moindres, pour une durée d'action donnée.

Mais le tableau XXVI montre que, même avec des courants déformés par la polarisation, les quantités liminaires croissent tout de même avec le temps à peu près comme avec des courants rectilignes. Si l'on se rappelle alors que les courbes des quantités mises en jeu, en fonction du temps, par les courants qui traversent le corps humain, présentent une double courbure due à la baisse, puis à la croissance de l'intensité, on se rendra compte que, lorsque l'on fera croître progressivement le voltage de la source, la courbe des quantités émises par le courant pourra atteindre la courbe des quantités liminaires, soit dans la région qui précède l'inflexion de la courbe et qui correspond en général à des durées courtes, soit dans la région terminale qui correspond à des durées relativement longues. C'est, le plus souvent, la première de ces alternatives qui se trouve réalisée, car les variations d'intensité qui précèdent le minimum d'intensité sont plus importantes que celles qui lui font suite.

Si nous augmentons les résistances et le voltage de la source, nous diminuons les courbures du graphique des quantités en fonction du temps, et il en résulte que l'excitation se fera pour des durées plus grandes : c'est l'accroissement du temps utile observé. En même temps, le coefficient angulaire de la tangente à l'origine de la courbe des quantités, qui est proportionnel au quotient du voltage par la résistance totale du circuit (résistance initiale du sujet + résistances addi-

tionnelles), ira en diminuant, ce qui explique l'allure de la courbe des voltages efficaces en fonction de la résistance du circuit. Enfin, quand le point d'excitation se trouvera au delà de l'inflexion, l'augmentation de voltage, en diminuant les variations d'intensité, nécessitera une augmentation de la quantité d'électricité pour la durée-limite d'excitation, et il pourra alors en résulter un accroissement du coefficient angulaire de la tangente à l'origine qui expliquera le redressement, d'ailleurs inconstant, de la dernière partie de la courbe des voltages en fonction des résistances.

Naturellement, si le point d'excitation se trouve, dès le début, sur la partie ascendante terminale de la courbe des quantités, ce qui se produira pour des muscles à grande chronaxie, le temps utile diminuera quand la courbe tendra à prendre une forme rectiligne, car Lapicque [28] a montré que les courants à intensité croissante produisaient l'excitation au bout d'un temps beaucoup plus long que les courants continus. De même, les intensités relatives des courants à haut ou bas voltage, au bout d'un certain temps de passage, sont réglés par la manière dont évolue la force contre-électromotrice, et notamment de la vitesse avec laquelle elle baisse au delà du maximum. On se rendra compte que différents cas peuvent se présenter qui correspondent aux faits d'observation.

Nous n'insisterons pas davantage sur le détail d'une question qui, en somme, n'est qu'une application indirecte des faits que nous avons établis précédemment.

Nous avons tenu seulement à mettre en évidence les complications profondes qu'entraîne la polarisation dans l'excitation électrique chez l'homme.

Pour y remédier, le procédé le plus simple, mais imparfait, consiste à élever le plus possible le voltage de la source de courant.

Un autre, qui paraît meilleur, mais nécessite un appareillage un peu encombrant et coûteux, est basé sur la propriété qu'ont les courants dans les circuits pourvus de self de ne changer d'intensité que lentement, quand on modifie la résistance ou les forces électromotrices siégeant dans le circuit. Nous avons montré, avec M. Dognon [29], que cette propriété, pouvait être utilement appliquée au problème de l'exploration électrique chez l'homme en réalisant des courants d'intensité sensiblement constante pendant tout le temps que dure le processus d'excitation.

CHAPITRE V

ANALOGIE ENTRE LA POLARISATION ET L'EXCITATION ÉLECTRIQUE

On a observé depuis longtemps certaines analogies entre les phénomènes de polarisation et les actions physiologiques des courants électriques. Rappelons que, suivant une ancienne hypothèse de Hermann, les courants électrotoniques seraient dus à des phénomènes de polarisation qui se passent entre le cylindre-axe des nerfs et leur gaine de myéline. Il montra d'ailleurs que l'on pouvait reproduire le phénomène sur un schéma.

Mais, certainement, c'est à Nernst [30] que l'on doit d'avoir le premier tenté une explication de l'effet exciteur des courants électriques par les actions antagonistes de l'accumulation des ions au voisinage des membranes, sous l'influence du courant et de la diffusion qui tend à rétablir l'égalité des concentrations dans les solutions électrolytiques.

Nernst ne s'est pas contenté d'une explication qualitative, il a traité la question par le calcul et est arrivé à une formule de l'excitation électrique qui, il faut bien le dire, est loin de rendre compte de tous les phénomènes observés. Lapicque [31] a soumis les idées de Nernst à une double critique théorique et expérimentale et a émis l'hypothèse que, ce qui importe pour l'excitation, c'est non la valeur même de la polarisation à la membrane, mais le rapport des concentrations en ce point et en un autre séparé de celui-là par une distance donnée. Comme le calcul devient alors extrêmement compliqué, Lapicque et Pétetin [32] ont eu l'ingénieuse idée de construire un schéma hydraulique qui fournit une image assez exacte du phénomène physique en jeu dans la théorie de l'excitation électrique. Grâce à ce modèle, ces auteurs ont pu reproduire les phénomènes d'excitation par différentes

formes de courant et constaté qu'ils concordent bien avec ce que donne l'expérimentation physiologique.

Notamment, en ce qui concerne le courant continu, ils ont observé que la fonction qui représente le phénomène causal de l'ébranlement nerveux ou musculaire commence par croître, passe par un maximum, et décroît en suite.

Nous avons nous-même essayé de suivre, par un tout autre moyen, les modifications produites dans l'excitabilité électrique par le passage d'un courant continu. Notre méthode consistait à rechercher, aux différents moments du passage d'un courant d'intensité inférieure au seuil d'excitation, quelle est la durée qu'il faut donner à un courant qui lui fait suite et qui est d'intensité beaucoup plus grande, pour que l'on obtienne la réponse minima du muscle. Si nous convenons d'évaluer l'excitabilité de l'organe par la différence entre les longueurs du deuxième courant, suivant qu'il agit seul ou précédé du premier, on peut représenter l'évolution de cette excitabilité par un graphique. L'expérience nous a montré que l'excitabilité ainsi définie commence par croître, passe par un maximum, puis décroît jusqu'à atteindre asymptotiquement une valeur inférieure à la valeur du début..

Au fur et à mesure que l'on diminue l'intensité du premier courant, on constate que l'augmentation initiale de l'excitabilité se fait moins rapidement, le maximum est moins élevé, la durée pour laquelle l'excitabilité redevient nulle est moins grande que dans le cas précédent et l'hyperexcitabilité terminale également moins prononcée. Enfin, pour des intensités très faibles, l'effet excitateur du début ne peut plus être décelé. Le courant semble avoir d'emblée une action inhibitrice sur l'excitabilité.

Nous avons également observé que la position du maximum d'excitabilité qui, naturellement, est voisine du temps utile pour les courants donnant le seuil, se rapproche progressivement de l'origine lorsque l'intensité du courant décroît. Il est à noter aussi que l'excitation produite par cet ensemble de deux courants successifs à intensité croissante n'est pas terminée pour des durées qui correspondent à ce qu'on a appelé « la phase réfractaire » pour les courants continus donnant le seuil. Cette durée-limite d'excitation dépend donc, comme l'avait déjà indiqué Lapicque [28], de la forme du courant utilisé. Ici, une remarque s'impose. S'il y a bien similitude, au début, entre la courbe d'excitabilité donnée par le schéma de Lapicque et celle que l'on peut déduire de nos expériences, l'accord ne se maintient plus au bout d'un cer-

tain temps, car la fonction qui est cause de l'excitation, d'après la théorie de Lapicque, ne présente jamais de valeurs négatives. Cela est simplement dû à la définition que l'on donne de l'excitabilité, différente dans les deux cas. Dans le schéma de Lapicque, on cherche à connaître l'origine physique de l'excitation, tandis que, dans nos expériences, nous avons dû nous contenter d'évaluer l'excitabilité par une grandeur liée plus ou moins directement au processus de l'excitation.

Nous ne pouvons passer en revue, même succinctement, tous les travaux qui ont abouti à resserrer cette analogie entre les deux sortes de phénomènes : excitation et polarisation. Mentionnons, tout au moins, les expériences de Lapicque [33], qui ont montré que la quantité d'électricité, retenue par polarisation aux surfaces d'une membrane de phosphate de chaux, placée dans une solution électrolytique, se comportait, en fonction de la durée du courant polarisant, comme les quantités liminaires d'excitation en fonction du temps.

Etant en possession d'une méthode permettant la mesure, dans d'assez bonnes conditions de précision, de la polarisation totale du corps humain, il était tout naturel de se demander si cette polarisation, considérée comme représentant le phénomène causal de l'excitation, avait, avec la durée et l'intensité du courant polarisant, les mêmes relations que le phénomène excito-moteur.

Si nous admettons que c'est la force contre-électromotrice de polarisation qui est l'origine plus ou moins immédiate de la mise en activité du muscle, on peut assimiler le seuil d'excitation à la valeur maxima de polarisation atteinte par un courant choisi arbitrairement. Lorsque nous provoquerons maintenant la polarisation par un courant plus intense, il se produira une polarisation maxima plus forte que la précédente. Mais on pourra toujours interrompre le courant à un moment tel que la polarisation atteinte à cet instant soit égale à celle du courant précédent. Nous pourrions ainsi mesurer, avec différentes intensités, les durées d'action nécessaires pour obtenir une polarisation donnée et voir si ces intensités et ces durées sont liées entre elles comme les grandeurs de même nature de différents courants donnant un même seuil d'excitation.

Nous avons fait un certain nombre d'expériences à ce sujet, et voici les résultats d'une d'entre elles.

TABLEAU XXIX

Sujet L. M. — Une grande électrode dans le dos, une petite sur le bord radial de l'avant-bras.

Résistance additionnelle : 20.000 ohms.

Un courant continu émis

sous 25 volts donne une force contre-électromotrice maxima de 15,8 volts, au bout de cinq millièmes^s secondes (interrupteur à chute).

DURÉES ET INTENSITÉS DE COURANT DONNANT LE MÊME DEGRÉ DE POLARISATION

Durée en 10 ⁻³ seconde	Voltage de la source	Quantités observées	Quantités calculées à partir de la relation : $Q = 26 + 19,8 t$
5	25	125	125
3,5	26,5	92,75	95,3
3	29,5	88,5	85,4
2,5	29,7	74,25	75,5
2	32,2	64,4	65,6
1,5	36,7	55,05	55,7
1	43,7	43,7	45,8
0,5	74	37	35,9

On constate que non seulement les quantités croissent avec le temps, comme les quantités liminaires d'excitation, mais encore que cet accroissement se fait suivant une fonction approximativement linéaire, comme on peut le vérifier en comparant les chiffres des deux dernières colonnes du tableau. L'écart n'atteint pas 5 %, ce qui est une approximation très satisfaisante pour des mesures de cette nature.

Si l'on reporte les quantités trouvées expérimentalement sur un graphique (fig. 16), on se rend compte qu'elles se disposent sensiblement suivant une droite inclinée sur l'axe des temps.

Puisque le parallélisme entre les phénomènes de polarisation et d'excitation se poursuit aussi loin, il est intéressant de calculer la durée qui représente, pour la polarisation, l'analogue de la chronaxie pour l'excitation. En cherchant, suivant la technique habituelle, quelle est la plus petite durée d'action que doit posséder un courant, émis sous un voltage double de celui du courant d'intensité minima, pour avoir la même efficacité que ce dernier, on trouve, dans le cas de l'expérience précédente, une durée d'environ 0,8 millièmes de seconde, ce qui est tout à fait de l'ordre des chronaxies de certains muscles squelettiques.

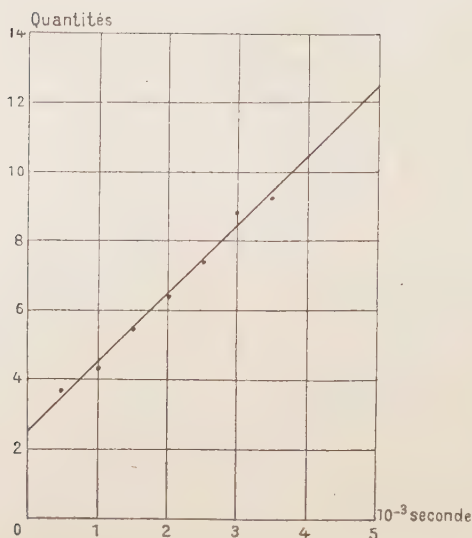


FIGURE 16.

*Courbes des quantités émises par des courants d'intensité variable
donnant une même polarisation
en fonction de la durée d'action de ces courants.*

Nous sommes donc en droit de conclure que l'analogie entre ces deux sortes d'action, l'une physico-chimique, l'autre physiologique, se retrouve jusque dans les vitesses avec lesquelles elles évoluent dans le temps.

Remarquons cependant que, pour la polarisation, on ne peut plus parler de *constante de temps*, indépendante des conditions expérimentales, comme pour l'excitation électrique. Nous avons pris, en effet, comme analogue du seuil galvanique, un courant d'intensité arbitraire, et la grandeur que nous appellerons, par abréviation, « *chronaxie de polarisation* » ne correspondrait réellement à la *chronaxie d'excitation* que si elle était indépendante du courant pris comme seuil rhéobasique. Il semble qu'il n'en soit rien. Dans des expériences où nous avons mesuré, dans les mêmes conditions, les *chronaxies de polarisation* avec des voltages rhéobasiques différents, nous avons observé que la *chronaxie* diminuait quand le voltage s'élevait.

En voici un exemple.

Avec 25 volts de rhéobase et 20.000 ohms en série, la « chronaxie de polarisation » pour la petite électrode posée sur la face antérieure de l'avant-bras s'est montrée égale à 0,6 millièmes de seconde. En doublant le voltage rhéobasique, cette chronaxie tombe à 0,37 millièmes de seconde.

Il convient d'ajouter que dans le premier cas le courant était incapable de provoquer aucune contraction musculaire, et que dans le deuxième, au contraire, les muscles situés sous l'électrode présentaient des contractions électriques assez fortes.

D'une manière générale, il nous a semblé que c'est quand les courants polarisants sont à peu près égaux aux courants donnant les seuils d'excitation que les deux espèces de chronaxie se trouvent du même ordre de grandeur.

Les expériences que nous avons effectuées sur le chien et dont nous avons déjà parlé aux chapitres précédents nous permettent d'affirmer que ce sont essentiellement les éléments cellulaires cutanés qui interviennent dans ces phénomènes.

D'ailleurs, si l'on mesure sur le chien, et dans les conditions relatées plus haut, les « chronaxies de polarisation » sur l'animal intact, puis sur la peau isolée, on trouve, dans le premier cas 0,13, et dans le deuxième cas 0,10 millièmes de seconde. Ces chiffres peuvent paraître extrêmement bas, mais il faut tenir compte qu'ils ont été obtenus avec des courants relativement très forts et qui provoquaient des secousses musculaires intenses. Ils n'en constituent pas moins une présomption pour l'origine cutanée des phénomènes, dont on mesure ainsi un facteur de vitesse.

On pourra s'étonner de constater que les chronaxies de polarisation aient alors une valeur notablement inférieure à celle que Lapicque et ses élèves sont amenés à admettre pour les cellules glandulaires. Mais rien n'est moins certain que ce soit les cellules glandulaires de la peau qui engendrent les phénomènes de polarisation. Il est très probable, au contraire, que ce sont les cellules épidermiques de la couche de Malpighi.

Il faut se rappeler aussi que, dans ses mesures de chronaxie sensitive, Bourguignon a trouvé, comme chronaxie d'éléments nerveux sensitifs, des chronaxies à peu près égales à celles des muscles sous-jacents, donc du même ordre de grandeur que celles que nous avons rencontrées.

Quant à la question de savoir si la chronaxie de polarisation varie avec les différentes régions de la peau, c'est là

une étude que nous n'avons pas entreprise et qui semble d'ailleurs à peu près irréalisable tant qu'on ne saura pas quelle est la valeur de la force contre-électromotrice qui joue, pour la polarisation, le rôle du seuil pour la contraction musculaire.

Ainsi, bien qu'il ne semble pas possible d'admettre que les forces contre-électromotrices que nous pouvons mesurer aient leur siège dans les régions où prend naissance l'excitation, il n'en est pas moins curieux de constater que les deux phénomènes ont des vitesses du même ordre. Comme il ne peut guère s'agir d'une simple coïncidence, nous devons en chercher l'explication dans une certaine similitude entre les propriétés physico-chimiques de tissus morphologiquement très différents.

CHAPITRE VI

MÉCANISME DE LA POLARISATION ÉLECTRIQUE DES TISSUS VIVANTS

Ainsi que l'a fait remarquer Nernst, la seule action que peut produire le courant galvanique dans un tissu organisé est un déplacement d'ions, c'est donc dans une modification de la répartition des ions au sein des tissus que nous devons chercher l'explication des phénomènes de polarisation que nous avons décrits.

Plusieurs auteurs ont émis à ce sujet d'intéressantes hypothèses qui, pour la plupart, pèchent par l'absence de base expérimentale, ou tout au moins n'ont été soumises qu'à une vérification expérimentale par trop indirecte, comme celle que l'on peut tirer, par exemple, de leur application aux théories de l'excitation électrique.

N'ayant pas de faits nouveaux à apporter pour résoudre ce problème, nous nous contenterons d'un bref résumé des théories proposées, puis nous indiquerons comment, selon nous, on doit envisager cette importante question, et quelles expériences nous paraissent pouvoir être tentées pour décider entre plusieurs hypothèses.

Le terme même de polarisation, qui peut être défini par l'existence d'une force contre-électromotrice subsistant après le passage du courant, implique l'existence, en certains points, d'un excès de charges positives auxquelles correspondent, en d'autres points, en vertu du principe de la conservation de l'électricité, une quantité égale de charges négatives en excès. C'est sur la manière dont se produit cette accumulation de charges que les opinions diffèrent.

On considère, en général, que certaines parties des cellules vivantes, ordinairement la couche ectoplasmique, fonctionne

comme membrane hémiperméable, ou tout au moins, très inégalement perméable, suivant les différents ions. Mais, tandis que Nernst et Riesenfeld se représentent cette membrane comme un milieu homogène séparant deux solutions et admettent que, dans un tel milieu, les mobilités des différents ions et les rapports de ces mobilités sont susceptibles de prendre des valeurs différentes de celles qu'elles ont dans l'eau, Girard [34] et V. Bethe, faisant intervenir la structure capillaire ou lacunaire des membranes vivantes, assimilent les phénomènes dont elle est le siège à ceux qui se produisent dans un tube capillaire, sous l'action des différences de potentiel existant entre les particules liquides et les parois du tube. Nous ne nous étendrons pas davantage sur les intéressantes recherches entreprises par Girard pour justifier sa théorie, car, en somme, cet auteur étudie surtout, sous le nom de polarisation, la force électromotrice provoquée par diverses actions : pression mécanique, poussée osmotique, plutôt que celle qui est engendrée par un courant électrique, et que nous avons seule à considérer ici.

A vrai dire, ce n'est pas l'apparition d'une force contre-électromotrice, due au passage du courant, qui paraît le plus difficile à expliquer. Il s'agit d'un phénomène qui présente vraisemblablement une certaine analogie avec les « chaînes de concentration » tant étudiées en Allemagne par W. Nernst, Cremer, E. Haber, etc... Ces auteurs ont montré comment, en mettant en présence deux liquides non miscibles, on réalise, sous l'influence du passage du courant, des mouvements d'ions qui se produisent avec des vitesses différentes pour chacun des milieux et entraînent des inégalités de potentiel. Mais les forces contre-électromotrices que l'on arrive à produire de la sorte sont très petites, à peine de l'ordre du dixième de volt, et la question se pose de savoir si les données histologiques permettent de supposer qu'il puisse se trouver assez d'éléments placés en série pour que la somme des tensions partielles puisse atteindre les valeurs parfois considérables que l'on observe.

Gildmeister [35] a étudié la question de très près, en se demandant, tout d'abord, quelle peut être l'origine des modifications qui surviennent dans l'intensité d'un courant émis, sous voltage constant, à travers l'organisme vivant.

La self-induction n'est pas à retenir pour plusieurs raisons. Elle augmenterait la résistance des courants alternatifs au lieu de la diminuer. De plus, une self aurait pour effet de retarder la période de l'intensité par rapport à celle du

voltage ; or, c'est l'inverse qui a lieu. Dans un pont de Kohlrausch, où le téléphone ne peut être amené au silence que lorsque les courants des différentes branches du pont sont en phase, une bobine de self mise en série avec le corps humain compense le décalage produit par celui-ci. Enfin, la self agirait sur la période d'établissement du courant d'une manière inverse de celle que nous avons constatée.

Il restait à savoir si l'on a affaire à une polarisation ou une capacité. D'après le physicien Wien, le facteur par lequel il faut diviser la résistance apparente au courant alternatif pour avoir la résistance vraie serait proportionnel au produit du coefficient de la self compensatrice par la fréquence, quand il s'agit d'une polarisation, et seulement au coefficient de self quand il s'agit d'une capacité. Les expériences de Gildmeister vérifient la première proposition. Les tissus auraient donc, d'après cet auteur, une capacité négligeable, mais seraient très polarisables.

Revenant récemment sur cette question, Gildmeister [36], cherche quelle devrait être la capacité d'un condensateur qui se déchargerait avec la même vitesse que met la polarisation à se détruire. Il déduit des expériences de David que le fac-

1

teur — doit être égal, au début de la dépolarisation, à 684 (1).

CR

Attribuant alors à *R*, qui représente la résistance du circuit intérieur, la valeur de 10.000 ohms, il trouve comme capacité de ce condensateur hypothétique le chiffre de 0,146 microfarad, qui, dit-il, concorde comme ordre de grandeur, avec celui qu'on obtient par une autre méthode n'exigeant pas la connaissance de la résistance du circuit de décharge.

A l'aide de cette valeur, il calcule ensuite l'épaisseur d'un condensateur de même capacité dont les armatures auraient les dimensions des électrodes et le diélectrique une constante égale à 5 ou 80, suivant qu'il est constitué par une matière aqueuse ou lipoïde. Dans les deux cas, il arrive à ce résultat que l'épaisseur doit être inférieure à un millième de millimètre. Il en conclut, ce qui pouvait sembler évident *a priori*, qu'on n'a pas affaire à un condensateur dont les tissus interposés entre les électrodes formeraient le diélectrique.

Il examine alors l'hypothèse selon laquelle d'autres surfaces minces, par exemple les membranes cellulaires, joue-

(1) Ce chiffre est du même ordre de grandeur, quoique plus petit que celui auquel nous sommes parvenus. (V. p. 83.)

raient le rôle de diélectrique, et il se propose de calculer l'épaisseur qu'on est porté à leur donner. D'après lui, et c'est d'ailleurs conforme à nos résultats, les cellules qui contribuent essentiellement à la production de la polarisation seraient celles de la peau et plus spécialement du stratum germinativum.

Les histologistes évaluent à une quinzaine le nombre des couches de ces cellules, ce qui fait en tout trente, en considérant les deux régions cutanées ; et, comme le courant devra traverser deux surfaces pour chaque cellule, nous arrivons au chiffre de 60 pour le nombre des couches du diélectrique.

En supposant que ces dernières sont constituées par des lipoides, on déduit de la capacité précédemment trouvée que l'épaisseur de chaque couche est de $3,5/10^{-7}$ cm. Si, au contraire, elle est de nature aqueuse, son épaisseur devrait être de $57,10^{-7}$ cm. Ces deux valeurs, remarque Gildmeister, sont tout à fait invraisemblables si l'on s'en tient à l'hypothèse du condensateur, la première à cause de sa petitesse, qui atteint à peine les dimensions des molécules d'un lipotide, la deuxième parce qu'on ne pourrait, d'après cet auteur, s'imaginer comment un milieu électrolytique peut jouer le rôle de diélectrique. Toute difficulté, par contre, disparaîtrait, selon lui, si l'on étend aux cellules vivantes la théorie de la polarisation métallique de K. Krüger. Il y aurait alors une double couche électrique chaque fois qu'il existe une différence de potentiel à la limite de deux phases. Or, c'est ce qui doit se produire dans le cas des cellules, que l'on considère leurs membranes comme construites suivant le schéma des deux solvants (Nernst, Cremer, Haber) ou assimilables à une paroi d'une structure poreuse. Si alors on fait agir une force électromotrice sur ces tissus, les doubles couches commencent par se charger, puis il s'établit des différences de concentration aux électrolytes limitrophes, et, par cela même, des chaînes de concentration. Lorsque l'on supprime la force électromotrice extérieure, les phénomènes se produisent en sens inverse. Les doubles couches se déchargent rapidement, puis les concentrations s'égalisent. Mais ces actions secondaires du courant électrique ne s'arrêtent pas là. Reprenant une ancienne hypothèse de Lapicque, Gildmeister admet qu'une partie des ions, amenés par le champ électrique au contact de la deuxième phase, y diffuse plus ou moins profondément. Ainsi s'expliquerait pourquoi les forces contre-électromotrices persistent plusieurs minutes après la traversée du courant. Cet auteur remarque, en outre, que le

chiffre qu'il adopte pour l'épaisseur de la double couche, soit $57,10^{-7}$ cm. est tout à fait du même ordre de grandeur que celui que les physiciens Gouy et Smoluchowski ont obtenu à partir de considérations absolument différentes.

Gildmeister essaie également de résoudre la question de la baisse de la polarisation au cours du passage du courant. Il ne pense pas qu'il s'agisse d'une excitation physiologique des cellules entraînant une modification dans la perméabilité des membranes limitrophes. La longue durée pendant laquelle la polarisation reste abaissée, ainsi que l'impossibilité de déceler un seuil à cet abaissement en rapport avec le courant polarisant, le font plutôt pencher vers une interprétation purement physique de cette diminution progressive de polarisation des membranes, qu'il ne précise d'ailleurs pas.

Nous avons tenu à donner un exposé assez complet de ces vues de Gildmeister sur le mécanisme de la polarisation, à cause de leur liaison étroite avec notre sujet. Mais il est à peine besoin d'en faire ressortir tout ce qu'elles comportent d'incomplet, de vague et d'obscur. Il ne semble pas que la capacité, telle qu'il la calcule à partir des courbes de dépolarisation, puisse être celle d'un des condensateurs élémentaires placés en batterie, puisqu'il utilise, comme résistance du circuit de décharge, la valeur de 10.000 ohms, qui ne peut être que celle du corps humain dans sa totalité.

Quant à la manière dont se chargent ces doubles couches, elle nous semble insuffisamment précisée dans le mémoire de Gildmeister. D'autre part, l'expérience ne vérifie pas que, même dans les tout premiers instants de la dépolarisation, on puisse assimiler la baisse du voltage à celui des armatures d'un condensateur qui se décharge dans une résistance. Nous avons montré, au contraire (chapitre II), qu'il n'était aucun moment où la courbe de dépolarisation avait les caractères d'une fonction exponentielle.

Ajoutons que si l'on limite, comme le fait Gildmeister, le nombre de couches à 60, on en arrive à cette conclusion que, pour des courants un peu forts, chaque couche doit être le siège d'une force contre-électromotrice de 6 à 7 dixièmes de volts, puisque nous avons fréquemment observé une polarisation atteignant 40 volts.

Dans le but de nous rendre compte si l'on pouvait reproduire, sur un schéma, des polarisations de membrane aussi fortes, nous avons effectué l'expérience suivante, avec la collaboration de M. Blanchetière. Nous avons préparé deux solutions de gélatine à 25 %, contenant 10 % d'un des sels sui-

vants : phosphate disodique cristallisé à six molécules d'eau et chlorure de calcium, neutralisé exactement à l'ammoniaque. Après avoir fait dissoudre ces solutions au bain-marie, nous les avons laissées refroidir, presque jusqu'à la prise, et les avons coulées par couches alternées de 5 millimètres environ dans un tube de 65 millimètres de diamètre. Pour différencier nettement les couches, nous avons coloré la solution de chlorure de calcium au rouge-congo. Nous avons pu, ainsi, superposer vingt et une couches, les couches extrêmes étant constituées par des solutions de chlorure de calcium, au contact desquelles étaient placées des électrodes impolarisables en argent revêtu électrolytiquement d'une couche de chlorure d'argent. Ces électrodes rectangulaires, ayant une surface de 20 cmq, ne recouvrent donc pas toute la surface de la gélatine.

Si l'on fait passer dans le tube ainsi rempli un courant de 50 milliampères pendant des durées croissantes, on voit que jusqu'à un centième de seconde, la polarisation reste faible, inférieure à un volt. au bout d'un quart d'heure 3,5 volts, et au bout d'une demi-heure 4 volts environ. Elle n'augmente plus ensuite que d'une valeur insignifiante si l'on continue à laisser passer le courant.

La dépolarisation se produit également très lentement à circuit ouvert. C'est ainsi qu'au bout de deux heures la force contre électromotrice a baissé de moitié, qu'au bout de quatre heures elle est encore de 1,7 volt et au bout de six heures de 1,5 volt. Nous voyons que, malgré l'intensité du courant, nous n'avons pu obtenir qu'une polarisation n'atteignant pas 0,2 volt par couches. Quant aux vitesses de polarisation et de dépolarisation, elles sont incomparablement plus lentes que celles que l'on observe sur l'homme et l'animal. Les seules conclusions que nous soyons en droit de formuler, c'est que les membranes vivantes, par l'amplitude de leur capacité de se polariser et la rapidité avec laquelle naît et disparaît leur polarisation, se comportent assez différemment de la membrane de phosphate de calcium précipité à l'état colloïdal.

Il nous semble qu'on peut envisager de deux manières différentes les origines de la force contre-électromotrice constatée après le passage du courant, et nous sommes étonnés que cette distinction n'ait, à notre connaissance, jamais été faite. Il est possible qu'il s'agisse d'une véritable force contre-électromotrice, comme on en rencontre dans différents phénomènes, et dont l'origine peut être de nature très diverse : chimique dans l'accumulateur que l'on charge, élec-

tromagnétique dans une machine de Gramme qui tourne sous l'action d'un courant, etc.

Mais il est également vraisemblable que la force contre électromotrice observée soit due à la charge de capacités mises en dérivation sur un conducteur.

C'est, à notre connaissance, Lapicque [33] qui a, le premier, introduit en électrophysiologie le modèle constitué par deux résistances placées en série et un condensateur disposé en dérivation sur l'une d'entre elles. Il a montré qu'un tel système pouvait reproduire, d'une manière approchée, les phénomènes d'excitation électrique.

Depuis, Philippon a interprété, à l'aide de ce même modèle, les faits qu'il a observés sur la conductibilité des tissus par des courants alternatifs de haute fréquence. Dans la première partie de ce travail, nous avons exposé ses conclusions avec quelque détail, ce qui nous dispensera d'y revenir.

On estimera peut-être un peu subtile et sans grand intérêt pratique cette façon de distinguer entre deux schémas de conductibilité assez voisins. Nous pensons cependant que le problème qui nous occupe se trouverait circonscrit, ou du moins posé avec plus de clarté, suivant que l'une ou l'autre de ces hypothèses serait confirmée par les faits.

Dans le premier cas, c'est dans les propriétés des membranes vivantes et dans les variations de leur perméabilité ionique que devrait en être cherché la solution. Dans le deuxième, au contraire, l'amplitude de la force contre électromotrice étant déterminée par la grandeur de la résistance avec laquelle elle se trouve en dérivation, la question de la variation de la polarisation serait ramenée à une question de variation de résistance. Il conviendrait alors de reprendre les hypothèses émises par les anciens auteurs, pour lesquels tout le problème de la conductibilité se ramenait à une simple variation de la résistance propre des tissus.

Et, de fait, si l'on admet qu'une partie de la résistance du corps humain baisse sous l'influence du passage du courant, on rend compte, du même coup, de l'allure de la courbe des intensités avec le temps. (V. fig. 4.) La première partie, jusqu'au minimum, correspondrait à la charge des capacités, tandis que la deuxième correspondrait à la baisse du voltage aux extrémités d'un conducteur dont la résistance diminue. Bien d'autres particularités que nous avons observées trouveraient là également leur raison d'être. Si l'on suppose que cette résistance reprend sa valeur initiale, très grande, aussi vite qu'elle la perd, on expliquerait de la sorte l'allure de la

courbe de dépolarisation qui est celle d'un condensateur qui se déchargerait dans un circuit dont la résistance augmenterait progressivement.

Enfin nous avons déjà signalé que cette baisse de résistance pouvait rendre compte de la diminution apparente de la capacité avec la fréquence signalée par Philippon.

Il ne paraît pas impossible d'imaginer par quelles sortes d'expériences nous pourrions obtenir quelques éclaircissements sur ce sujet. Il n'est pas douteux, par exemple, que la quantité d'énergie dégagée sous forme de chaleur, par un courant continu, doit être très différente suivant que l'une ou l'autre de ces hypothèses serait vérifiée.

A supposer qu'aucune autre transformation énergétique ne vienne compliquer les choses, on pourrait peut-être, par des mesures calorimétriques, acquérir quelques précisions sur la conductibilité des tissus.

Il serait bon également d'étudier la rapidité avec laquelle se produit la dépolarisation, suivant la durée de passage du courant polarisant, son intensité, les dimensions des électrodes, etc.

On obtiendrait ainsi d'utiles indications sur les variations de résistance du circuit à travers lequel se neutralisent les quantités d'électricité libérées par le courant. Le fait qu'on ne change pas apparemment grand'chose à la vitesse de dépolarisation, en reliant les électrodes par un circuit assez peu résistant, donne à penser que la résistance du circuit intérieur de décharge de chacune des capacités doit elle-même être assez faible et sans doute inférieure aux 10.000 ohms admis par Gildemeister.

Le volume des tissus dans lequel se fait sentir l'action du courant peut également varier avec la durée de passage de ce courant. D'après une observation de Bourguignon, les surfaces de la peau où l'excitation est maxima serait plus petites pour les courants de courte durée que pour les courants donnant le seuil galvanique.

On peut concevoir, en effet, qu'une fois que les capacités qui se trouvent sur le trajet de résistance minima ont acquis leurs charges le courant puisse charger, par des voies dérivées d'autres capacités, en diffusant dans des régions de plus en plus étendues.

Nous avons entrepris quelques expériences qui montrent comment cette question pourrait être abordée. Le principe est le suivant : la polarisation produite par un courant modifiée en général l'intensité d'un courant d'intensité très faible,

passant entre deux petites électrodes exploratrices. On conçoit qu'en réglant la durée du courant polarisant et en déterminant la position-limite des électrodes exploratrices pour laquelle la perturbation se fait encore sentir, on pourra peut-être mettre en évidence une diffusion progressive du courant dans les tissus.

Nous n'irons pas plus loin dans la voie des hypothèses. En les multipliant, on ne prouverait qu'une chose, c'est que nous sommes fort peu renseignés sur la manière dont se produit le passage de l'électricité à travers la matière vivante.

Mais, avant de terminer, nous voudrions rappeler que le phénomène physique que l'on mesure dans la polarisation est lié à la vie même du protoplasma. Tout agent qui cause la mort de la substance vivante diminue la polarisation dans des proportions considérables.

Même au cours de la vie, la polarisation peut se trouver modifiée dans d'assez grandes proportions sous l'influence du système nerveux. Gildmeister, à la suite des recherches qu'il consacre depuis plusieurs années à l'étude du réflexe psycho-galvanique, est amené à cette conclusion qu'il s'agit d'une action des fibres nerveuses sympathiques sur la perméabilité ionique des membranes vivantes.

Nous avons vu que Schwartz est arrivé à modifier expérimentalement cette perméabilité des cellules cutanées chez la grenouille, par excitation des nerfs afférents à la face interne du tégument. Chez l'homme, certains changements brusques, que nous avons remarqués dans la polarisation de sujets qui servaient ordinairement à nos expériences, et quelques observations analogues de David, ne peuvent guère s'interpréter que par l'intervention d'une action nerveuse.

Enfin nous avons récemment entrepris une série de recherches sur la comparaison des polarisations de deux emplacements cutanés symétriques, chez des malades atteints d'hémiplégie.

Alors que, chez des sujets normaux, les régions symétriques donnent sensiblement des forces contre-électromotrices égales sous l'influence des mêmes courants, chez les hémiplégiques on observe des inégalités très nettes, traduisant un trouble dans la fonction sympathique.

Nous n'insisterons pas davantage sur ces recherches, qui sont à peine ébauchées, et dont nous ne faisons mention que pour montrer que l'étude de la polarisation n'est pas seulement d'ordre physique ou même électrophysiologique, mais qu'elle envahit le domaine de la biologie générale.

Aussi n'est-il pas excessif de penser que les déterminations des forces contre-électromotrices et les mesures de résistances initiales constitueront peut-être un moyen d'exploration physique de certaines fonctions organiques, encore peu connues.

Ne serait-ce qu'à ce titre, l'étude physique de la conductibilité des organismes vivants, dont nous venons de poser les premiers jalons dans le présent travail, mériterait d'être poursuivie.

CONCLUSIONS

I. — L'étude, au moyen d'un galvanomètre balistique, du passage d'un courant traversant le corps humain sous un voltage constant, nous a permis de mettre en évidence des modifications importantes de l'intensité de ce courant dès les premiers instants qui suivent la fermeture du circuit.

1° Ces modifications ne sont pas dues à des actions siégeant au niveau des électrodes.

Elles sont imputables au corps humain. Si on les rapporte à un changement dans la résistance électrique apparente de ce dernier, on est amené à considérer séparément deux phases dans le passage du courant.

2° Pendant la première, qui est ordinairement de l'ordre de quelques millièmes de seconde, la résistance apparente croît jusqu'à une valeur maxima, pour diminuer ensuite, d'abord assez rapidement, puis de plus en plus lentement.

La valeur maxima peut atteindre un chiffre deux à cinq fois plus grand que celui qui exprime la grandeur de la résistance pour une durée de quelques secondes.

3° Lorsque le voltage augmente, la résistance décroît toujours, quel que soit l'instant considéré ; de plus, l'amplitude de ses variations diminue également. La position du maximum change aussi avec le voltage et est d'autant plus rapprochée de l'origine que ce dernier est plus élevé. Par contre, elle s'éloigne de l'origine quand on augmente, toutes choses restant égales, la grandeur des résistances additionnelles.

4° La différence des résistances pour deux voltages donnés croît, au moins entre certaines limites, avec la durée d'action du courant. Il en est de même du rapport de la plus grande résistance à la plus petite.

5° Si, pour rendre compte des phénomènes observés, on suppose l'existence d'une force contre électromotrice de polarisation, celle-ci doit croître avec le temps jusqu'à une certaine valeur maxima de 10 à 20 volts, pour diminuer ensuite.

II. — A l'aide d'un dispositif automatique approprié, on peut déterminer, par la méthode d'opposition, la valeur de la force électromotrice existant entre les électrodes, un temps très court (quelques cent millièmes de seconde) après la cessation du courant polarisant.

1° La force contre-électromotrice de polarisation ainsi observée se trouve être du même ordre de grandeur que celle déduite des mesures balistiques, c'est-à-dire beaucoup plus élevée qu'on ne la supposait jusqu'à présent.

2° Elle croît avec la durée de passage du courant jusqu'à une valeur maxima, pour diminuer ensuite de plus en plus lentement.

3° Lorsque l'intensité du courant augmente, il y a tout d'abord augmentation de la valeur maxima, qui croît cependant moins vite que l'intensité et déplacement du maximum vers l'origine des temps.

4° Le rapport de la force contre-électromotrice maxima au voltage de la source est d'autant plus élevé que la résistance du circuit est moindre et que le voltage avec lequel est émis le courant polarisant est plus faible.

5° La baisse de la polarisation après le maximum est d'autant plus lente que le rapport précédent est plus faible.

6° Au delà d'une certaine valeur de l'intensité, la polarisation n'augmente plus sensiblement ; seule la rapidité d'apparition du maximum continue à croître. Cette limite supérieure de la polarisation est d'autant plus élevée et a lieu pour des courants d'autant plus forts que les électrodes sont plus larges.

7° A densité égale de courant, la polarisation est d'autant plus accusée que les électrodes sont plus larges.

8° L'ensemble des tissus traversés par le courant contri-

bue à produire la polarisation, mais la peau joue, à ce point de vue, un rôle prépondérant.

9° Lorsque le courant a cessé d'agir, la polarisation se détruit très rapidement. Cette décroissance n'a pas lieu, comme les décharges de condensateur, suivant une fonction exponentielle.

Par rapport à celle-ci, on peut considérer la vitesse de décroissance comme allant progressivement en se ralentissant.

III. — En déterminant, par une technique analogue à la précédente, la différence de potentiel minima existant entre les extrémités d'un sujet, mis en série avec une résistance connue et parcouru par un courant continu, on peut calculer la résistance initiale du corps humain.

1° Cette résistance est beaucoup plus faible que la résistance apparente, déterminée par application de la loi d'Ohm pour de longues durées d'action de courant.

2° Elle semble peu influencée par le passage du courant et les variations de voltage de la source. Elle se comporte donc, en première approximation, comme une résistance électrolytique.

IV. — La polarisation des tissus, en provoquant des variations considérables d'un courant émis sous voltage constant, est une source de difficultés pour la mesure de l'excitabilité électrique.

Parmi les modifications qu'entraîne la polarisation dans les facteurs des courants donnant le seuil d'excitation, deux sont particulièrement accusées.

1° La quantité d'électricité produisant l'excitation, dans un temps donné, est d'autant plus petite que l'importance relative de la polarisation par rapport au voltage d'excitation est plus grande.

2° La mesure de la chronaxie est ordinairement entachée d'une erreur par défaut d'autant plus considérable que l'importance relative de la polarisation est plus grande.

V. — 1° Si l'on mesure les quantités d'électricité nécessaires

pour amener un certain degré de polarisation pris comme seuil dans des temps différents, on constate que ces quantités croissent, avec les durées d'action, suivant une fonction sensiblement linéaire, semblable à la loi de Weiss pour l'excitation.

2° Le calcul, d'après cette relation, de la grandeur qui serait l'analogue de la chronaxie, donne un chiffre du même ordre de grandeur que la chronaxie des muscles squelettiques de l'homme.

3° Si l'on augmente la valeur de la polarisation choisie comme seuil, on observe une diminution de la durée correspondant à la chronaxie.

VI. — 1° La polarisation doit être due à une accumulation d'ions à la surface de membranes vivantes douées d'une perméabilité ionique très inégale suivant les différentes substances.

2° Dans l'état actuel de nos connaissances, toutes les hypothèses que l'on peut émettre, pour essayer de préciser les conditions de cette polarisation, la nature des capacités où s'accumule l'électricité, leurs relations avec les résistances intérieures, ainsi que les différents schémas proposés dans le même but, ne peuvent être discutés utilement faute d'une base expérimentale assez solide.

3° La perméabilité sélective des membranes, dont dépend la polarisation, est liée à l'intégrité vitale des tissus et disparaît (au moins en majeure partie) avec elle. Sur le vivant, elle est influencée par le système nerveux, probablement végétatif.

A ce point de vue, l'on doit considérer la mesure de la force contre-électromotrice de polarisation, ainsi que celle de la résistance initiale, comme pouvant constituer d'utiles modes d'exploration de certaines fonctions organiques.

BIBLIOGRAPHIE

1. STINTZING et GRAEBER. — Der Elektrophysiologische Leitungswiderstand des menschlichen Körpers und seine Bedeutung für die Elektrodiagnostik. (*Deutsch. Arch. f. Klin. Med.*, XL, 20 janvier 1887.)
2. JOLLY. — Untersuchungen über den elektrischen Leitungswiderstand des menschlichen Körpers. (*Festschrift*, Strassburg, 1884.)
3. FREY et WUNDSCHIED. — Der faradische Leitungswiderstand des menschlichen Körpers. (*Neurologisches Centralblatt*, 1891.)
4. SWINBURNE. — De l'effet du courant continu et du courant alternatif sur le corps humain. (*La Lumière électrique*, 1890.)
5. ST. LEDUC. — Sur la résistance électrique du corps humain. (*Annales d'Electrobiologie et de Radiologie*, 1908.)
6. VIGOUROUX. — Sur la résistance électrique considérée comme signe clinique. (*Progrès médical*, 1888, p. 86.)
7. SILVA et PESCAROLO. — Della resistenza elettrica del corpo umano in condizioni normali e patologiche. (*Rivista sperimentale*, XV, 1889.)
8. OVERTON. — Beiträge zur allgemeinen Muskel- und Nervenphysiologie. (*Pflüger's Archiv.*, t. 82, 1902.)
9. CASTEX. — *Précis d'Electricité médicale*, Paris, 1907.
10. DU BOIS-REYMOND. — Ueber secundär elektromotor. Erscheinungen an Muskeln, Nerven und elektr. organen. (*Sitzungsber der Berliner Academie*, 1883, 1889 et 1890.)
11. LARAT. — *Traité pratique d'Electricité médicale*, Paris, 1910.
12. HERMANN. — Ueber den Längs und Querwiderstand der Muskeln. (*Arch. f. d. ges. Physiol.*, XXIX.)
Untersuchungen über die Polarisation der Muskeln und der Nerven. (*Ibid.*, XLII.)
13. G. WEISS. — Choix de la méthode à employer dans les mesures de résistance du corps humain. (*Bulletin de la Société des Electriciens*, mars 1889.)
— La résistance électrique du corps humain. (*Archives d'Electricité médicale*, 1893.)
14. M. CHANZ. — Contribution à l'étude de la polarisation de l'homme vivant. (*Annales d'Electrobiologie et de Radiologie*, 1908-1910.)
15. G. BOURGUIGNON. — Mesures de résistances par les décharges de condensateur. (*Soc. de Biol.*, 17 juin 1916.)
16. J. CLUZET. — Electro-diagnostic au moyen des décharges de condensateurs. (*Journal de Radiologie et d'Electrologie*, mars 1914, p. 121.)
17. M. GILDMEISTER. — Ueber die in tierischen Körper bei elektrischen Durchströmung entstehenden Gegenkräfte. (*Pflügers Archiv*, t. 149, 1913. — et *Ibid.*, t. 162.)
18. GALLER. — Ueber den elektrischen Leitungswiderstand der tierischen Körper. (*Pflügers Archiv*, t. 149, 1913.)
19. SCHWARTZ. — Ueber das galvanische Verhalten der konstant durchströmten Froschhaut bei Reizung ihrer Nerven. (*Zentralblatt für Physiologie*, t. XXVII, 1913.)
20. HÖBER. — *Physikalische Chemie der Zelle und der Gewebe*, Leipzig, 1911.

21. PHILIPPSON. — Les lois de la résistance électrique des tissus vivants. (*Bull. de la classe des Sciences de l'Ac. roy. de Belgique*, 4 juin 1921.)
 - Application des lampes à trois électrodes à la mesure de la résistance électrique des cellules et des tissus vivants. (*Arch. intern. de Physiol.*, vol. XVIII, août-décembre 1921.)
 - Sur une nouvelle forme de résistance électrique des électrolytes. (*Classe des Sciences. Ac. roy. de Belgique*, 4 février 1922.)
 22. E. DAVID. — Ueber die sekundär elektromotrischen Eigenschaften der menschlichen Haut. (*Arch. f. d. ges. Physiol.*, t. 195, 1922.)
 23. G. WEISS. — Sur la possibilité de rendre comparable entre eux les appareils servant à l'excitation électrique. (*Arch. ital. de Biol.*, t. XXXV, fasc. III, pp. 413-452, 1901.)
 24. K. LUCAS. — On the rate of development of the excitatory process in muscle and nerve. (*Journal of Physiology*, t. XXXVII, p. 459, 1908.)
 25. L. LAPICQUE. — *Techniques nouvelles pour l'électro-diagnostic*. (C. R., t. 161, 22 novembre 1915.)
 26. VERRY et COLLE. — L'excitabilité du cœur de grenouille perfusé à la solution glucose-bicarbonate. (C. R. de la Soc. de Biol., t. XCI, 1924, p. 104.)
 27. L. LAPICQUE. — Considérations préalables sur la nature du phénomène par lequel l'électricité excite les nerfs. (*Journal de Physiol. et de Pathol. génér.*, 1907, p. 365.)
 28. L. LAPICQUE. — Expérience montrant qu'il n'y a pas une durée-limite pour l'excitation. (*Journal de Physiol. et Pathol. génér.*, 1908, p. 624.)
 29. A. STROHL et A. DOGNON. — L'utilisation des circuits à grande self pour réaliser l'excitation électrique par courants constants chez l'homme. (*Journal de Radiologie et d'Electrologie*, avril 1923.)
 30. W. NERNST. — Zur theorie des Elektrischen Reizes. (*Pflügers Archiv.*, t. CXXII, 1908, pp. 275-314.)
 31. L. LAPICQUE. — Théorie de l'excitation électrique. (*Journal de Physiol. et de Pathol. génér.*, 1908, p. 601.) — Conditions physiques de l'excitation électrique étudiées sur un modèle hydraulique de la polarisation. (*Journal de Physiol. et de Pathol. génér.*, 1909, p. 1019.)
 - Conditions physiques de l'excitation électrique. (*Journal de Physiol. et de Pathol. génér.*, 1910, p. 1009 et 1035.)
 32. L. LAPICQUE et J. PÉTETIN. — Nouvelles recherches sur un modèle de polarisation en vue de la théorie physique de l'excitation. (*Journal de Physiol. et de Pathol. génér.*, 1910, p. 696.)
 33. L. LAPICQUE. — Polarisation de membrane dans les électrolytes du milieu physiologique reproduisant la loi de l'excitation électrique des nerfs. (C. R. de la Soc. de Biol., 6 juillet 1907, p. 37.) — Recherches quantitatives sur l'excitation électrique des nerfs traitée comme une polarisation. (*Journal de Physiol. et de Pathol. génér.*, 1907, p. 620.)
 34. P. GIRARD. — Recherches expérimentales sur le mécanisme physico-chimique de l'hémiperméabilité des cellules vivantes aux électrolytes. (*Journal de Physiol. et de Pathol. génér.*, 1910, p. 471.)
 35. M. GILDMEISTER. — Ueber Polarisation, Kapazität und Leitungswiderstand tierischer Gewebe. (*Zentralblatt. f. Physiol.*, t. 28, 1914.)
 36. M. GILDMEISTER. — Zur Theorie der sekundär elektromotrischen Eigenschaften der menschlichen Haut. (*Arch. f. d. ges. Physiol.*, t. 195, 1922.)
-

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	5
APERÇU HISTORIQUE SUR LA CONDUCTIBILITÉ ÉLECTRIQUE DES TISSUS VIVANTS	11
CHAPITRE PREMIER	
Etude de la conductibilité électrique pour des courants de faible durée.	31
CHAPITRE II	
Recherches sur la polarisation électrique.....	53
CHAPITRE III	
Recherches sur la résistance initiale.....	84
CHAPITRE IV	
Influence de la polarisation sur la mesure de l'excitabilité électrique.	100
CHAPITRE V	
Analogies entre la polarisation et l'excitation électrique.....	108
CHAPITRE VI	
Mécanisme de la polarisation électrique des tissus vivants.....	115
CONCLUSIONS	125
BIBLIOGRAPHIE	129

DEUXIÈME THÈSE

PROPOSITIONS DONNÉES PAR LA FACULTÉ

Hydratation des colloïdes minéraux.

Travaux de Van Bemmelen.

VU ET APPROUVÉ :

Paris, le 28 octobre 1924.

P. le Doyen de la Faculté des Sciences,

L'Assesseur,

JEAN PERRIN.

VU

LE PERMIS D'IMPRIMER :

Le Recteur de l'Académie de Paris,

P. APPELL.

